



Pedro Simões Chaves Madres enformadas a frio com chapas de revestimento
Verificação à temperatura normal e em situação de incêndio



Pedro Simões Chaves Madres enformadas a frio com chapas de revestimento
Verificação à temperatura normal e em situação de incêndio

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Nuno Filipe Ferreira Soares Borges Lopes, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e coorientação científica do Doutor Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Prof. Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
professora associada da Universidade de Aveiro

Prof. Doutora Aldina Maria da Cruz Santiago
professora auxiliar da Universidade de Coimbra

Prof. Doutor Nuno Filipe Ferreira Soares Borges Lopes
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

No final desta fase da minha vida, gostaria de aqui expressar os meus sinceros agradecimentos a todos os que me ajudaram a realizar este objetivo pessoal.

Desta forma, é com enorme respeito que agradeço ao meu orientador Prof. Nuno Lopes pela sua supervisão, disponibilidade, paciência, acessibilidade e dedicação, enfim por todas as suas qualidades profissionais e humanas.

Ao meu coorientador Prof. Paulo Vila Real pela ajuda e disponibilidade manifestada, e pelas valiosas sugestões fornecidas durante a execução desta dissertação.

E por último, aos meus amigos e à minha família que sem os quais não seria o que sou nem chegaria onde cheguei no meu percurso humano e académico.

palavras-chave

perfis enformados a frio, encurvadura, chapas de revestimento, incêndio, eurocódigo 3.

resumo

A presente dissertação tem como interesse aumentar o conhecimento do comportamento estrutural dos elementos enformados a frio na construção.

Este trabalho descreve e analisa as metodologias preconizadas na parte 1-3 do Eurocódigo 3 para a avaliação da resistência de madres enformadas a frio, considerando chapas de revestimento, com o intuito de melhor compreender o comportamento destes elementos em situações de aplicações comuns como as de madres de cobertura expostas ao fogo.

Também se compara a formulação proposta na parte 1-3 do Eurocódigo 3 para a determinação da resistência de madres enformadas a frio, com chapas de revestimento, com os resultados obtidos numericamente através do programa de elementos finitos SAFIR tanto à temperatura ambiente como a elevadas temperaturas.

keywords

cold-formed sections, buckling, sheeting, fire, eurocode 3

abstract

The purpose of this thesis is to increase the knowledge of the behaviour of cold-formed elements in construction.

This work describes and analyzes the recommended methods in part 1-3 of Eurocode 3 for the evaluation of the resistance of cold-formed purlins, considering coating sheets, with the intention of better understanding the behavior of these elements in situations of common usage like those of the purlins exposed to fire.

It also compares the formulation proposed in part 1-3 of Eurocode 3 for determining the resistance of cold-formed purlins, with coating sheets, with the results obtained numerically using the program SAFIR of finite elements in room temperature as well as in elevated temperatures.

“O homem nunca sabe do que é capaz, até que o tenta”

Charles Dickens (1812-1870)

Índice

Índice	I
Índice de Figuras	III
Índice de Tabelas	VI
Nomenclatura.....	VIII
Lista de Acrónimos.....	XII
1. Introdução	1
1.1. Considerações gerais	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Estrutura da dissertação	3
2. Resistência dos elementos isolados (madres) – Análise estrutural.....	7
2.1. Considerações gerais	7
2.2. Propriedades geométricas	10
2.2.1. Cálculo das características geométricas para secções abertas	11
2.2.2. Influência dos cantos redondos.....	11
2.2.3. Limitações geométricas	13
2.3. Fenómenos de instabilidade.....	14
2.4. Cálculo da secção transversal efetiva	15
2.5. Dimensionamento à temperatura ambiente	16
2.5.1. Resistência das secções transversais.....	16
2.5.2. Resistência do elemento	18
2.6. Dimensionamento em situação de incêndio	20
2.6.1. Considerações gerais	20
2.6.2. Propriedades mecânicas dos enformados a frio a temperaturas elevadas ...	21
2.6.3. Classificação das secções	23
2.6.4. Resistência das secções transversais.....	23
2.6.5. Resistência dos elementos	25
3. Madres restringidas por chapas perfiladas.....	29
3.1. Considerações gerais	29
3.2. Dimensionamento à temperatura ambiente	30
3.2.1. Resistência da secção transversal	30
3.2.2. Resistência do elemento	34
3.2.3. Restrição conferida pelas chapas de revestimento ao perfil	35
3.2.3.1. Rigidez rotacional C_D	35
3.2.3.2. Rigidez lateral K	40
3.2.4. Resistência do banzo livre à encurvadura.....	41
3.3. Dimensionamento em situação de incêndio	44
3.3.1. Resistência da secção transversal	44
3.3.2. Resistência do elemento	46
3.3.3. Restrição dada pelas chapas de revestimento ao perfil	46
3.3.4. Resistência do banzo livre à encurvadura.....	46
3.4. – “Stressed skin design” – Efeito diafragma na resistência ao corte da ligação das chapas de revestimento às madres	48
3.5. Fatores que condicionam a rigidez conferida pelas chapas aos perfis	49
3.5.1. Influência da geometria da chapa perfilada	50

3.5.2.	Influência da espessura das chapas.....	51
3.5.3.	Influência do espaçamento entre conectores	53
3.5.4.	Influência da posição da fixação do perfil à chapa.....	55
3.5.5.	Influência da secção transversal do perfil.....	56
3.5.6.	Influência de temperaturas de incêndio	57
4.	Estudo numérico	63
4.1.	Considerações gerais	63
4.1.1.	Métodos dos elementos finitos (MEF)	63
4.1.2.	Descrição geral do programa SAFIR.....	64
4.1.3.	Descrição geral do programa Cast3m aplicado com o RUBY	66
4.2.	Casos de Estudo.....	67
4.2.1.	Propriedades da secção	67
4.2.2.	Definição dos modelos numéricos.....	69
4.3.	Madres enformadas com diferentes graus de liberdade restringidos.....	70
4.3.1.	Modelos numéricos	70
4.3.2.	Modos de instabilidade.....	74
4.3.2.1.	Carregamentos ascendentes.....	74
4.3.2.2.	Carregamentos descendentes.....	77
4.3.3.	Resistência à encurvadura do elemento isolado	79
4.3.3.1.	Carregamentos ascendentes.....	79
4.3.3.1.1.	Temperatura ambiente	79
4.3.3.1.2.	Situação de incêndio.....	82
4.3.3.2.	Carregamentos descendentes.....	83
4.3.3.2.1.	Temperatura ambiente	83
4.3.3.2.2.	Situação de incêndio.....	85
4.3.4.	Comparação dos resultados obtidos no SAFIR com a formulação preconizada pelo Eurocódigo 3	85
4.4.	Madres enformadas a frio com chapas de revestimento.....	90
4.4.1.	Modelos numéricos	90
4.4.2.	Resistência à encurvadura	91
4.4.2.1.	Carregamentos ascendentes.....	91
4.4.2.2.	Temperatura ambiente	92
4.4.2.2.1.	Situação de incêndio.....	94
4.4.2.3.	Carregamentos descendentes.....	95
4.4.2.3.1.	Temperatura ambiente	95
4.4.2.3.2.	Situação de incêndio.....	97
4.4.3.	Discussão de resultados	97
5.	Considerações finais	103
5.1.	Conclusões gerais	103
5.2.	Desenvolvimentos futuros	105
6.	Referências bibliográficas	109
A.1	Programa Safir	115
A.2	Programa Ruby	119

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2.1 - Tipos de conexão	7
Figura 2.2 - Exemplos de formas de perfis enformados a frio (CEN, 2006a).....	8
Figura 2.4 - Laminagem a frio “por rolos”(Veríssimo, 2008).....	9
Figura 2.5 - Processo de quinagem (Arrais, 2012)	10
Figura 2.6 - Nós da secção transversal (CEN, 2006a).....	11
Figura 2.7 - Identificação dos pontos “P” (CEN, 2006a)	13
Figura 2.8 - (a) Modo de encurvadura local; (b) Modo de encurvadura distorcional; (c) Modo de encurvadura global (Adaptado de (Camotim&Borges, 2010),(Arrais, 2012))	14
Figura 2.9 - Modos de encurvadura numa viga com secção transversal em “C” (Kankanamge, 2010)	15
Figura 2.10 - Resistência à flexão em função da esbelteza (CEN, 2006a).....	16
Figura 2.11 - Aumento da tensão de cedência devido ao processo de fabrico dos enformados a frio (Vatsala, 2014)	17
Figura 2.12 - Fatores de redução para a relação tensões-extensões para elementos, em aço carbono, a temperaturas elevadas (CEN, 2005b)	24

Capítulo 3

Figura 3.1 - Exemplos de chapas perfiladas (CEN, 2006a)	29
Figura 3.2 - (a) Modelo do conjunto chapa de revestimento mais madre em “C” (Basaglia et al., 2013); (b) Efeito catenária (Lim&Young, 2007).....	30
Figura 3.3 - Sobreposição de esforços (CEN, 2006a))	30
Figura 3.4 - Módulo de flexão lateral, W_{fz} , em torno de z-z	31
Figura 3.5 - Fator de carga lateral k_{h0} , para carregamentos aplicados no centro de corte das secções (CEN, 2006a).....	32
Figura 3.6 - Fator de carga lateral equivalente k_h (CEN, 2006a))	32
Figura 3.7 - Carga lateral equivalente (CEN, 2006a)	33
Figura 3.8 - Modelos representativos das restrições conferidas pelas chapas perfiladas (CEN, 2006a).....	35
Figura 3.9 - Tipo de conexão chapa perfil.....	37
Figura 3.10 - Modelo para o cálculo de $C_{D,C}$ de acordo com a parte 1-3 do EC3 (CEN, 2006a)	39
Figura 3.11 - Conexão madre à chapa perfilada (adaptado de (CEN, 2006a)).....	41
Figura 3.12 - Variação do esforço de compressão no banzo livre numa viga contínua sob a ação de um carregamento; (a) gravítico, (b) ascendente (CEN, 2006a).....	42
Figura 3.13 - O efeito “Stressed skin” numa cobertura plana (adaptado(CEN, 2006a)).....	48
Figura 3.14 - a) Diafragma tipo viga com as chapas de revestimento perpendiculares ao vão; b) Diafragma tipo viga com as chapas de revestimento paralelas ao vão (Davies, 2006).....	49
Figura 3.15 - Representação esquemática da interação entre as chapas perfiladas e os perfis metálicos.....	50

Figura 3.16 - Influência da espessura das chapas perfiladas na rigidez rotacional (C_D) em carregamentos ascendentes.....	52
Figura 3.17 - Influência da espessura das chapas perfiladas na rigidez lateral (K) em carregamentos ascendentes.....	52
Figura 3.18 - Influência da espessura das chapas perfiladas em carregamentos descendentes	53
Figura 3.19 - Influência do espaçamento entre conectores em carregamentos ascendentes.....	54
Figura 3.20 - Influência do espaçamento entre conectores em carregamentos descendentes	54
Figura 3.21 - Influência da posição de fixação do perfil nas chapas perfiladas em carregamentos descendentes.....	55
Figura 3.22 - Influência da secção transversal dos perfis em carregamentos ascendentes	56
Figura 3.23 - Influência da secção transversal dos perfis em carregamentos descendentes.....	57
Figura 3.24 - Influência da temperatura, em carregamentos ascendentes, numa chapa perfilada do tipo “P1-272-30”	58
Figura 3.25 - Influência da temperatura, em carregamentos descendentes, numa chapa perfilada do tipo “P1-272-30”	58

Capítulo 4

Figura 4.1 - Subdivisões, para um elemento viga, adotadas numa modelação em SAFIR	64
Figura 4.2 - Definição da geometria e dos eixos locais (Franssen, 2011).....	65
Figura 4.3 - Definição da geometria dos elementos viga	66
Figura 4.4 - Seções adotadas na modelação numérica	67
Figura 4.5 - Aplicação das cargas na definição dos modelos numéricos	70
Figura 4.6 - Modelos considerados no estudo de madres enformadas a frio.....	71
Figura 4.7 - Sentido do carregamento	71
Figura 4.8 - Modelo 1 - Modelo numérico adotado (centro) com as condições de apoio (cantos superiores), aplicação das cargas (canto inferior esquerdo), eixos considerados (canto inferior direito)	72
Figura 4.9 - Modelo 2 - Modelo numérico adotado (esquerda), restrição lateral aplicada (canto superior direito), eixos considerados (canto inferior direito)	72
Figura 4.10 - Modelo 3 - Modelo numérico adotado (esquerda), restrições à rotação (canto inferior direito), eixos considerados (canto inferior direito)	73
Figura 4.11 - Modelo 4 - Modelo numérico adotado (esquerda), restrições (lateral e à rotação) aplicadas (direita)	73
Figura 4.12 - Comportamento de estabilidade do elemento correspondente ao 1º modo de encurvadura (vista frontal) – Modelo 1	75
Figura 4.13 - Comportamento de estabilidade do elemento correspondente ao 1º modo de encurvadura (vista frontal) – Modelo 2	75
Figura 4.14 - Comportamento de estabilidade do elemento correspondente ao 1º modo de encurvadura (vista frontal) – Modelo 3	76
Figura 4.15 - Comportamento de estabilidade do elemento correspondente ao 1º modo de encurvadura (vista frontal) – Modelo 4	76
Figura 4.16 - Comportamento de estabilidade do elemento correspondente ao 1º modo de encurvadura (vista frontal) – Modelo 1	77

Figura 4.17 - Comportamento de estabilidade do elemento correspondente ao 1º modo de encurvadura (vista frontal) – Modelo 2	78
Figura 4.18 - Comportamento de estabilidade do elemento correspondente ao 1º modo de encurvadura (vista frontal) – Modelo 3	78
Figura 4.19 - Comportamento de estabilidade do elemento correspondente ao 1º modo de encurvadura (vista frontal) – Modelo 4	79
Figura 4.20 - Deformação dos perfis, para os diferentes modelos, correspondente à carga última	81
Figura 4.21 - Deformação dos perfis, para os diferentes modelos, correspondente à carga última para carregamentos descendentes	84
Figura 4.22 - Tensão de colapso obtida, pelas duas abordagens consideradas, para os diferentes modelos à temperatura ambiente em carregamentos ascendentes	86
Figura 4.23 - Tensão de colapso obtida, pelas duas abordagens consideradas, para os diferentes modelos a 500°C em carregamentos ascendentes	87
Figura 4.24 - Tensão de colapso obtida, pelas duas abordagens consideradas, para os diferentes modelos à temperatura ambiente em carregamentos descendentes	89
Figura 4.25 - Tensão de colapso obtida, pelas duas abordagens consideradas, para os diferentes modelos a 500°C em carregamentos descendentes	89
Figura 4.26 - Modelo adotado para simular o efeito das chapas de revestimento nos perfis	90
Figura 4.27 - Comportamento de um perfil restringido por uma chapa perfilada em carregamentos ascendentes	94
Figura 4.28 - Comportamento de um perfil restringido por uma chapa perfilada em carregamentos descendentes	96

Anexos

Figura A.1 - Pasta com os ficheiros necessários à utilização do SAFIR	115
Figura A.2 - Conteúdo do ficheiro “teste” parte 1 de 3	116
Figura A.3 - Conteúdo do ficheiro “teste” parte 2 de 3	116
Figura A.4 - Conteúdo do ficheiro “teste” parte 3 de 3	117
Figura A.5 - Conteúdo do ficheiro “fload”	117
Figura A.6 - Conteúdo do ficheiro “t” para temperaturas elevadas	118
Figura A.7 - Conteúdo do ficheiro “t”	118
Figura A.8 - Ficheiro Executável “SAFIR2011”	118
Figura A.9 - Layout do programa RUBY	119
Figura A.10 - Opções gerais RUBY	120
Figura A.11 - Correspondência entre eixos referenciais RUBY	120

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Limites admissíveis para enformados a frio (CEN, 2006a)	13
Tabela 2.2 - Curva de encurvadura para secções transversais em “C” e “Z (CEN, 2006a)	19
Tabela 2.3 - Valores recomendados dos fatores de imperfeição para as curvas de encurvadura lateral	19
Tabela 2.4 - Fatores de redução para perfis enformados a frio com secções de Classe 4 a temperaturas elevadas.....	22
Tabela 3.1 - Valores para o momento fletor lateral inicial, $M_{0,fz,Ed}$ e para o fator corretivo K_R (CEN, 2006a)).....	34
Tabela 3.2 - Coeficiente de rotação C_{100} e largura $b_{T,max}$ para chapas perfiladas trapezoidais (CEN, 2006a).....	38
Tabela 3.3 - Coeficientes η_i para carregamentos descendentes com 0,1,2,3 e 4 tirantes (CEN, 2006a).....	44
Tabela 3.4 - Coeficientes η_i para carregamentos ascendentes com 0,1,2,3 e 4 tirantes (CEN, 2006a)	44
Tabela 3.5 - Configurações possíveis que condicionam a influência das chapas no dimensionamento dos perfis (adaptado de (CEN, 2006a)).....	50
Tabela 3.6 - Características geométricas das chapas perfiladas comerciais da empresa O Feliz (OFELIZ, 2014).....	51
Tabela 4.1 - Dimensões da secção bruta real e propriedades da secção bruta efetiva de um Perfil C110x43x1.5.....	68
Tabela 4.2 - Dimensões da secção bruta real de uma chapa perfilada do tipo “P1-272-30”	69
Tabela 4.3 - Cargas críticas correspondentes ao primeiro modo de encurvadura para os diferentes modelos (carregamentos ascendentes).....	74
Tabela 4.4 - Cargas críticas correspondentes ao primeiro modo de encurvadura para os diferentes modelos (carregamentos descendentes).....	77
Tabela 4.5 - Tensão última obtida para os diferentes modelos - carregamentos ascendentes	80
Tabela 4.6 - Tensão de colapso obtida para os diferentes modelos em situação de incêndio (carregamentos ascendentes)	82
Tabela 4.7 - Tensão de colapso obtida para os diferentes modelos (carregamentos descendentes).....	83
Tabela 4.8 - Tensão de colapso obtida para os diferentes modelos em situação de incêndio (carregamentos descendentes)	85
Tabela 4.9 - Comparação de resultados à temperatura de 20°C em carregamentos ascendentes.	86
Tabela 4.10 - Comparação de resultados à temperatura de 500°C em carregamentos ascendentes.	87
Tabela 4.11 - Comparação de resultados à temperatura de 20°C em carregamentos descendentes.	88
Tabela 4.12 - Comparação de resultados à temperatura de 500°C em carregamentos descendentes.	89

Tabela 4.13 - Secção transversal adotada, em função do sentido do carregamento, para o elemento viga.....	91
Tabela 4.14 - Tensão de colapso obtida, para carregamentos ascendentes, para perfis com chapas de revestimento a 20°C	93
Tabela 4.15 - Tensão de colapso obtida, para carregamentos ascendentes, para perfis com chapas de revestimento a 500°C	95
Tabela 4.16 - Tensão de colapso obtida, para carregamentos descendentes, para perfis com chapas de revestimento a 20°C	95
Tabela 4.17 - Tensão de colapso obtida, para carregamentos descendentes, pela modelação numérica para perfis com chapas de revestimento a 500°C	97
Tabela 4.18 - Comparação entre os resultados obtidos para a tensão de colapso e a tensão de colapso de referência	98

Nomenclatura

Letras maiúsculas latinas

A_g	Área da secção bruta;
$A_{g,sh}$	Valor da área da secção idealizada (com cantos retos);
A_{eff}	Área da secção efetiva;
C_1, C_2, C_3	Coefficientes para determinar M_{cr} ;
C_D	Rigidez rotacional fornecida pela chapa;
E	Módulo de elasticidade longitudinal do aço;
$E_{fi,d}$	Valor de cálculo das ações em situação de incêndio
G	Módulo de distorção;
I_g	Momentos principais centrais de inercia da secção bruta;
$I_{g,sh}$	Momentos principais centrais de inercia da secção idealizada;
I_w	Constante de empenamento;
I_w	Constante de empenamento da secção bruta;
$I_{w,sh}$	Constante de empenamento da secção idealizada (com cantos retos);
$I_{w,eff}$	Constante de empenamento da secção efetiva;
I_y, I_z	Momentos de inércia de uma parede da secção em torno do eixo y-y ou z-z no centro de gravidade da secção;
$I_{y,eff}, I_{z,eff}$	Momento de inércia de uma parede da secção em torno do eixo y-y ou z-z no centro de gravidade da secção efetiva;
K	Rigidez da mola;
L	Comprimento do elemento;
L_{cr}	Comprimento crítico do elemento;
$M_{b,fi,t,Rd}$	Valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral, em situação

	de incêndio, no instante t ;
$M_{b,Rd}$	Valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral;
M_{cr}	Momento crítico para encurvadura lateral;
$M_{c,Rd}$	Momento fletor resistente da secção;
M_{Ed}	Valor de cálculo do momento fletor atuante;
M_{el}	Momento elástico resistente;
$M_{fi,Ed}$	Valor de cálculo do momento fletor atuante, em situação de incêndio;
$M_{fi,\theta,Rd}$	Valor de cálculo do momento resistente da secção transversal para uma temperatura uniforme, θ_a , no instante t numa secção transversal que não é termicamente influenciada pelos apoios;
$M_{b,fi,t,Rd}$	Valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral no instante t em situação de incêndio;
$M_{fz,Ed}$	Momento fletor lateral atuante;
M_{Rd}	Valor de cálculo do momento fletor resistente;
N_{Ed}	Valor de cálculo do esforço norma atuante;
$R_{fi,d}$	Valor de cálculo da capacidade resistente das ações em situação de incêndio
W_{eff}	Módulo de flexão da secção transversal efetiva;
W_{el}	Módulo de flexão elástico;
W_{pl}	Módulo de flexão plástico;
W_{fz}	Módulo de flexão lateral na direção z-z;

Letras minúsculas latinas

$b_{p,i}$	É a largura nominal do elemento plano i , na secção transversal com cantos retos (secção idealizada);
f_u	Tensão última do aço;

f_y	Tensão de cedência do aço;
f_{ya}	Valor médio da tensão de cedência do aço;
f_{yb}	Valor da tensão base de cedência do aço;
k	Fator de ampliação dos momentos;
k_w	Fator relativo ao empenamento;
k_1	Fator de adaptação para a distribuição de temperatura não uniforme na secção transversal;
k_2	Fator de adaptação para a distribuição de temperatura ao longo da madre;
k_θ	Fator de redução;
$k_{E,\theta}$	Fator de redução para o módulo de elasticidade;
$k_{y,\theta}$	Fator de redução da tensão de cedência do aço à temperatura atingida no instante t ;
$k_{y,\theta,max}$	Fator de redução da tensão de cedência do aço à máxima temperatura atingida no instante t ;
$k_{p,0,2,\theta}$	Fator de redução da tensão de cedência do aço correspondente ao limite convencional de proporcionalidade a 0.2%;
r	Raio da curva do canto da secção transversal;
r_j	É o raio interno do elemento curvo j ;
t	Espessura das paredes da secção bruta;
$X_{d,\bar{t}}$	Valor de cálculo da propriedade mecânica em situação de incêndio;
X_k	Valor característico da propriedade mecânica à temperatura ambiente;
z_g	Distância no eixo $z-z$ entre o ponto de aplicação da carga e o centro de corte;
z_j	Distância no eixo $y-y$ entre o ponto de aplicação da carga e o centro de corte;

Caracteres do alfabeto grego

α	Fator de imperfeição;
χ	Fator de redução para encurvadura por flexão;
χ_d	Fator de redução para a encurvadura distorcional;
χ_{fi}	Fator de redução para a encurvadura por flexão, em situação de incêndio;
χ_{LT}	Fator de redução para a encurvadura lateral;
$\chi_{LT,fi}$	Fator de redução para a encurvadura lateral, em situação de incêndio;
ϕ	Rotação (curvatura);
Φ	Coeficiente utilizado para o cálculo do fator de redução da encurvadura por flexão;
Φ_{LT}	Coeficiente utilizado para o cálculo do fator de redução da encurvadura lateral;
$\Phi_{LT,\theta}$	Coeficiente utilizado para o cálculo do fator de redução da encurvadura lateral, à temperatura θ ;
Y_{M0}	Coeficiente parcial de segurança que diz respeito à resistência das seções transversais;
Y_{M1}	Coeficiente parcial de segurança refere-se à resistência dos elementos em relação a fenómenos de encurvadura;
$Y_{M,fi}$	Coeficiente parcial de segurança em situação de incêndio
η_{fi}	Fator de redução para o valor de cálculo do nível de carregamento em situação de incêndio;
λ	Esbelteza adimensional do elemento;
$\bar{\lambda}_p$	Esbelteza adimensional normalizada do elemento;
$\bar{\lambda}_{e\max}$	Esbelteza normalizada máxima
$\bar{\lambda}_{LT}$	Esbelteza adimensional normalizada para encurvadura lateral;
ν	Coeficiente de Poisson;

Lista de Acrónimos

CEA	Comissão de Energia Atómica
CEN	Comité Europeu de Normalização
EC3	Eurocódigo 3
EN	Norma Europeia
MEF	Método dos Elementos Finitos
SAFIR	Safety Fire Resistance. Programa baseado no método dos elementos finitos para análise térmica e estrutural desenvolvido por Franssen

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações gerais

1.2. Objetivos

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações gerais

Por razões de natureza diversa, seja estética ou económica, a construção em geral e os engenheiros em particular têm sido desafiados ao longo do tempo a idealizar estruturas cada vez mais esbeltas, leves e resistentes. A procura por uma maior eficiência estrutural conduziu a diversas soluções, onde o aço e os perfis enformados a frio emergem como uma das mais vantajosas (Kankanamge, 2010). Em construção metálica os três tipos principais de elementos estruturais de aço são: i) perfis laminados a quente; ii) perfis de chapa soldados e iii) perfis de chapa fina enformados a frio (Wei-Wen, 2000).

O desenvolvimento da tecnologia que permitiu a enformagem a frio surgiu no ramo automóvel através do desenvolvimento de tecnologias específicas para enformar a frio os componentes de vários tipos de veículos com fins estruturais. Não passou muito tempo até que a indústria aeronáutica, condicionada pela absoluta necessidade de obter estruturas simultaneamente leves e resistentes, se assumisse um domínio privilegiado para o emprego de chapas metálicas com espessuras muito pequenas (Fena, 2011). A produção dos enformados a frio consiste, essencialmente, em duas técnicas distintas: a laminagem a frio “por rolos” (*cold rolling*) e a quinagem (*press braking*). Sendo que a laminagem a frio “por rolos” é o processo mais utilizado, uma vez que se trata de uma produção sistematizada, normalizada e extramente eficiente. Usa-se sempre que se pretenda atingir grandes quantidades de produção e sempre que haja necessidade de perfis com maior complexidade. Por outro lado, a quinagem é um processo menos industrializado é utilizado na realização de secções relativamente simples e é associado a pequenas quantidades de produção (Wei-Wen, 2000).

No setor da construção o uso dos perfis de aço enformados a frio remonta ao ano de 1850 e está associado à Inglaterra e aos Estados Unidos da América. No entanto, a aplicação destes elementos em estruturas de edifício surge a partir de 1940. Inicialmente estes elementos eram utilizados em construções comerciais e industriais, sendo que apenas recentemente passaram a ser usados em habitações multi-familiares (Wei-Wen, 1999).

A baixa relação peso/resistência; a possibilidade de obtenção de geometrias variadas; a elevada economia no armazenamento, transporte e manuseamento faz com que os perfis enformados a frio sejam vistos como uma solução competitiva em remodelações e reabilitações de estruturas antigas (Veríssimo, 2008).

Os elementos enformados a frio podem ser classificados em dois grupos principais: i) perfis de peças lineares e ii) chapas perfiladas. Dentro dos perfis, pode-se fazer a distinção de acordo com o tipo de secção entre: i) secções abertas; ii) secções compostas fechadas e iii) secções compostas abertas (Wei-Wen, 1999). Os perfis são definidos como peças lineares (barras de eixo retilíneo e secção uniforme). Os painéis de chapa e as chapas perfiladas, enformadas a frio, são peças laminares com superfície poligonal, utilizadas em lajes mistas, em estruturas de suporte de paredes, pavimentos e coberturas (Dubina *et al.*, 2012).

Estudar o comportamento estrutural destes elementos é complexo devido ao número de fenómenos, de natureza diversa, existentes em seções tão esbeltas, como por exemplo fenómenos de instabilidade. Em 2013 investigadores da universidade de Coimbra concluíram que a análise de elementos finitos preconizada pela parte 1-3 do Eurocódigo 3, para o dimensionamento de vigas enformadas a frio, é uma ferramenta fiável e fornece bons resultados para madres em que as dimensões dos vãos não sejam superiores a 3m (Laím *et al.*, 2013). Estudos recentes demostram, ainda, que a EN1993-1-3 sobredimensiona os esforços de flexão atuantes no banzo comprimido (Li *et al.*, 2012), sendo em alguns casos demasiado conservativos (Arrais *et al.*, 2014).

No entanto neste trabalho, ainda que de forma exploratória, pretende-se ver os perfis e as chapas de revestimento como um conjunto. Deste modo procura-se compreender a influência que as chapas de revestimento têm no comportamento estrutural dos perfis, quer à temperatura ambiente, quer em situação de incêndio.

Recentemente um grupo de investigadores concluiu que a introdução de ligações, entre as chapas de revestimento e as vigas enformadas a frio, capazes de assegurar a correta interação dos diferentes elementos garante ao conjunto maior eficiência estrutural. Pelo que, no cálculo estrutural das madres é economicamente vantajoso considerar o efeito do conjunto, em vez de se adotar a metodologia tradicional que despreza o efeito das chapas de revestimento no dimensionamento dos perfis. (Basaglia *et al.*, 2013).

Quando as estruturas de aço são expostas a uma situação de incêndio, dá-se o aumento da temperatura dos elementos, provocando uma severa redução da resistência e da rigidez, podendo estes, em último caso, entrar em colapso (Ranawaka&Mahendran, 2009). As restrições a que as madres estão sujeitas, quer sejam impostas pelas chapas de revestimento ou por outro mecanismo qualquer, podem desempenhar um papel importante na melhoria do comportamento ao fogo destas estruturas. A temperatura elevada, se as madres estiverem devidamente fixadas nos pórticos principais de maneira a aguentarem as forças de corte produzidas pelo efeito catenária, o conjunto (madres mais chapas de revestimento) pode adquirir um comportamento tipo catenária. Isto é, as vigas passam a comportar-se como cabos (Lim&Young, 2007).

1.2.Objetivos

Este trabalho consiste na análise das metodologias preconizadas na parte 1-3 do Eurocódigo 3 para a avaliação da resistência de madres enformadas a frio, considerando chapas de revestimento.

De uma maneira exploratória, pretende-se perceber a influência das chapas de revestimento no dimensionamento dos perfis quer em situação normal quer em situação de incêndio. Serão realizadas simulações numéricas do comportamento estrutural do conjunto, madre mais chapa de revestimento, com o programa de elementos finitos SAFIR de modo a comparar os resultados obtidos com os atingidos, com recurso a uma ferramenta de cálculo desenvolvida no Microsoft Office Excel, através da formulação presente na parte 1-3 do Eurocódigo 3 (CEN, 2006a).

1.3.Estrutura da dissertação

A estrutura da dissertação contempla 6 capítulos, que se dividem pelas diferentes etapas de execução da dissertação e do estudo elaborado.

No Capítulo 1 é apresentada uma descrição genérica de conceitos e assuntos que são fundamentais para a compreensão do estudo elaborado, os assuntos que já foram abordados e objeto de estudo, assim como os objetivos deste trabalho e os pontos que se pretendem estudar.

No Capítulo 2 é feita uma descrição sobre os perfis de aço enformados a frio, sobre as suas aplicações, processos de fabrico, características que devem ser tidas em conta para este trabalho e os principais problemas associados a estes perfis. O dimensionamento quer à temperatura ambiente quer a temperaturas elevadas é abordado considerando os perfis como elementos isolados.

No Capítulo 3 é abordada a influência das chapas de revestimento no dimensionamento dos perfis enformados a frio. O dimensionamento é realizado considerando o conjunto chapa de revestimento mais perfil. É apresentado, ainda, um estudo sobre os fatores que condicionam as restrições conferidas pelas chapas de revestimento aos perfis.

No Capítulo 4 é apresentado o estudo numérico elaborado, descrevendo os programas utilizados, é definido o modelo numérico mais adequado para posteriormente se avaliar a resistência estrutural do conjunto madre mais chapa de revestimento.

E por fim no Capítulo 5 são expostas as conclusões finais e os pontos que são importantes estudar no futuro.

CAPÍTULO 2

RESISTÊNCIA DOS ELEMENTOS ISOLADOS (MADRES) – ANÁLISE
ESTRUTURAL

2. RESISTÊNCIA DOS ELEMENTOS ISOLADOS (MADRES) – ANÁLISE ESTRUTURAL

2.1. Considerações gerais

2.2. Propriedades geométricas

2.2.1. Cálculo das características geométricas para secções abertas

2.2.2. Influência dos cantos redondos

2.2.3. Limitações geométricas

2.3. Fenómenos de instabilidade

2.4. Cálculo da secção transversal efetiva

2.5. Dimensionamento à temperatura ambiente

2.5.1. Resistência das secções transversais

2.5.2. Resistência do elemento

2.6. Dimensionamento em situação de incêndio

2.6.1. Considerações gerais

2.6.2. Propriedades mecânicas dos enformados a frio a temperaturas elevadas

2.6.3. Classificação das secções

2.6.4. Resistência das secções transversais

2.6.5. Resistência dos elementos

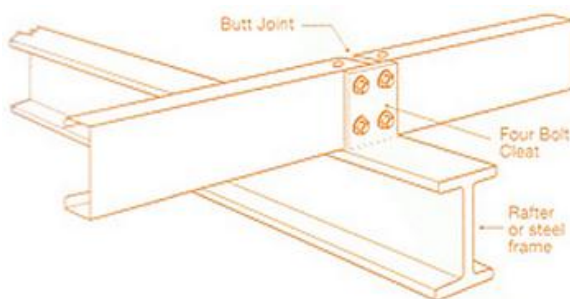
2. RESISTÊNCIA DOS ELEMENTOS ISOLADOS (MADRES) – ANÁLISE ESTRUTURAL

2.1.Considerações gerais

Os perfis enformados a frio são amplamente utilizados como madres, soluções intermediárias entre elementos estruturais da cobertura principal, podendo também ser usados em pórticos industriais, suporte de paredes, pavimentos e coberturas (Li, 2009).

Quer nos sistemas de cobertura moderna, quer em reabilitação de estruturas antigas, as madres de aço enformadas a frio têm sido aplicadas, devido à sua leveza e elevada eficiência estrutural, de forma bastante competitiva relativamente a outras soluções tradicionais. Atualmente existem quatro tipos de sistemas de madres, frequentemente encontradas, com diferentes modos de continuidade: i) vão único; ii) vão duplo; iii) vãos múltiplos - “*multi-span*”- com conexões de encaixe e iv) vãos múltiplos com sobreposições (CEN, 2006a). A Figura 2.1 (a) exemplifica ligação de madres em “C”, com a mesma secção transversal, através de conexão de encaixe. Os perfis são dispostos de modo a ficarem com a secção transversal lado a lado. Com recurso a uma chapa colocada na alma de ambos e através de fixação mecânica (parafusos) dá-se a conexão dos perfis.

Na Figura 2.1 (b) está representada uma conexão, de perfis “Omega”, por meio de sobreposição. Neste caso um perfil, de maior secção transversal, é colocado sobre outro e a fixação é feita por meio de parafusos. Os perfis já vêm com a furação.



(a) Conexão de encaixe (APEX, 2014)



(b) Sobreposição de perfis (Constalica, 2014)

Figura 2.1 - Tipos de conexão

A capacidade de carga dos sistemas de madres, referidos anteriormente, está diretamente relacionada com o tipo de aço e com a geometria das secções transversais.

Com o aumento da aplicação dos perfis enformados a frio surge a necessidade de clarificar a influência das propriedades geométricas no dimensionamento e perceber quais são os fenómenos que afetam a estabilidade dos mesmos (Chung&Ho, 2005).

Os elementos enformados a frio podem ser classificados em dois grupos principais: i) perfis de peças lineares e ii) chapas perfiladas. Dentro dos perfis pode-se fazer a distinção, tal como a Figura 2.2 ilustra, de acordo com o tipo de secção entre: a) secções abertas; b) secções compostas fechadas e c) secções compostas abertas (Wei-Wen, 1999).

Os perfis enformados a frio são peças lineares (barras de eixo retilíneo e secção uniforme) com secções em que a altura pode variar desde os 50 mm até aos 400 mm e a espessura entre 0,5 a 6 mm (Dubina et al., 2012).

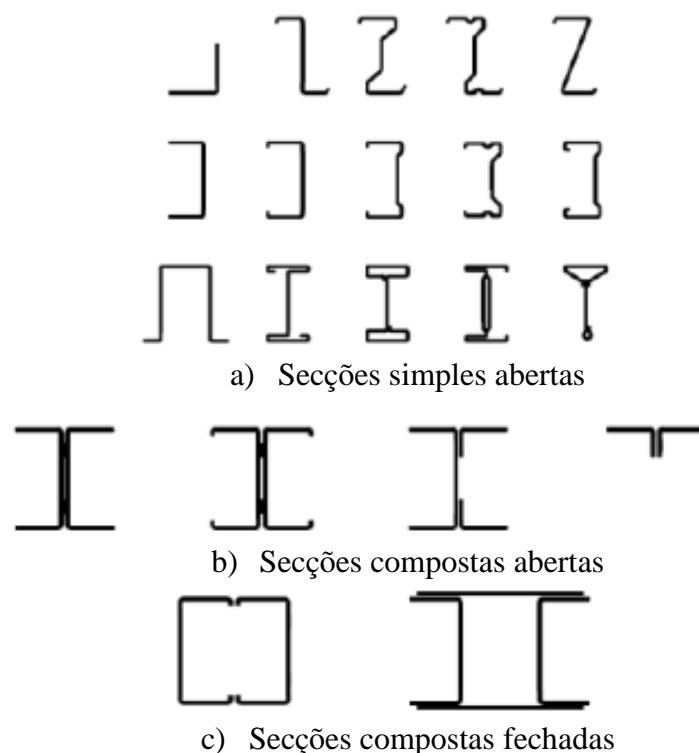


Figura 2.2 - Exemplos de formas de perfis enformados a frio (CEN, 2006a)

No que diz respeito ao processo de fabrico dos enformados a frio este tem por base, essencialmente, duas técnicas distintas: a laminagem a frio “por rolos” (*cold rolling*) e a quinagem (*press breaking*) (Dubina et al., 2012).

Estes métodos de fabricação têm um papel determinante em algumas das características que afetam o comportamento estrutural dos perfis, desde logo, provocam a alteração da curva de tensão-extensão do aço. Em relação ao material no seu estado original, a laminagem a frio proporciona um aumento da tensão de cedência e da tensão de rotura. Já o processo de quinagem mantém as características nos banzos praticamente inalteráveis (Arrais, 2012).

A laminagem a frio “por rolos” consiste na condução de uma folha de aço contínua através de uma série de rolos opostos, deformando o aço plasticamente para lhe atribuir a forma desejada. Cada par de rolos produz uma deformação específica. Um par de rolos opostos é designado por “etapa”. Na Figura 2.3 é exemplificado o processo de produção de um perfil com a secção transversal em “Z”. Em geral, quanto mais complexa é a forma transversal pretendida, maior é o número de “etapas” necessárias (Veríssimo, 2008). É o processo mais utilizado, visto que consiste numa produção sistematizada, normalizada e extramente eficiente. Usa-se sempre que se pretenda atingir grandes quantidades de produção e sempre que haja necessidade de produzir perfis com maior complexidade. Uma das grandes limitações da laminagem a frio “por rolos” é o tempo necessário para a mudança dos rolos quando se pretende realizar secções diferentes. Por este facto, são utilizados com alguma frequência rolos reguláveis que permitem uma mudança rápida, para uma largura de secção e/ou profundidade diferentes (Arrais, 2012).

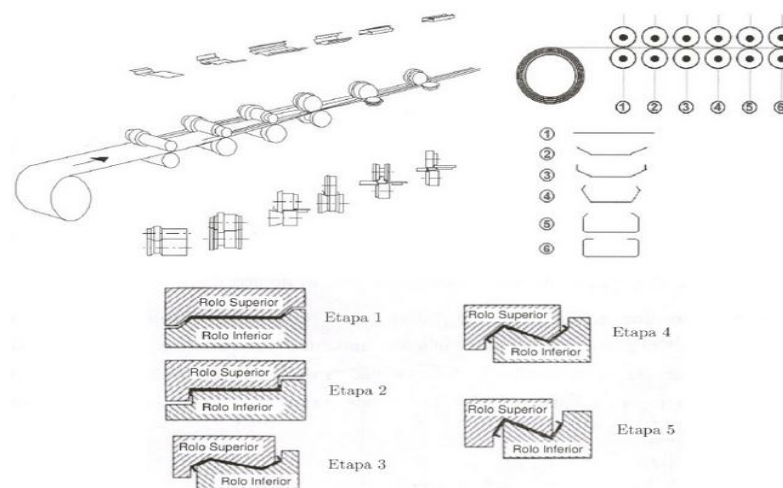


Figura 2.3 - Laminagem a frio “por rolos”(Veríssimo, 2008)

A quinagem ou (*press breaking*) é um processo menos industrializado e por isso é essencialmente utilizado na realização de secções relativamente simples. É associado a

pequenas quantidades de produção. As peças são de pequenos comprimentos e geometria simples. O processo consiste na dobragem de uma chapa, de comprimento específico, através da prensagem contra um negativo com a forma pretendida. A Figura 2.4 ilustra as diferentes fases no processo de quinagem de um perfil com a secção em “C”(Arrais, 2012).

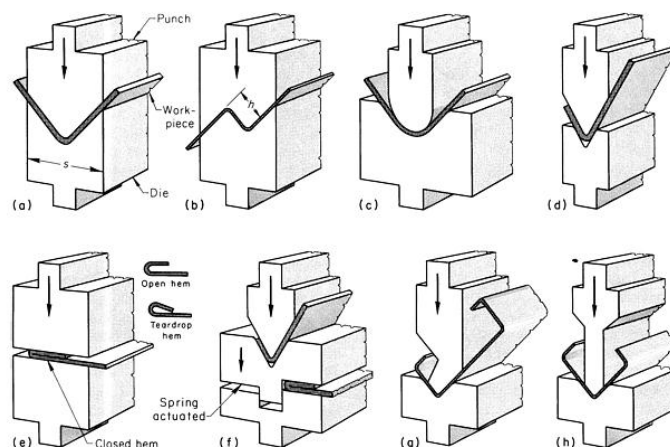


Figura 2.4 - Processo de quinagem (Arrais, 2012)

Em situação de incêndio as propriedades mecânicas dos perfis enformados a frio deterioram-se rapidamente, resultando numa perda de capacidade de suporte de carga dos elementos estruturais. Para que um incêndio possa ocorrer é necessário que três fatores existam em simultâneo: uma fonte de calor, um combustível e um comburente (Vila Real, 2003). A elevada temperatura, atingida em situação de incêndio, as estruturas metálicas no geral e os elementos enformados a frio em particular, devido à combinação da alta condutividade térmica do aço com a elevada esbelteza dos elementos, proporcionam um rápido aumento da temperatura do material e uma diminuição considerável da resistência. Sidey e Teague concluíram que a redução da resistência de elementos enformados a frio pode ser de 10 a 20% maior do que a dos elementos laminados a quente, devido à composição metalúrgica e efeitos de superfície molecular (Ranawaka&Mahendran, 2009).

2.2.Propriedades geométricas

Na maior parte das situações é a aplicação que se pretende para determinado elemento que determina a geometria da secção transversal do mesmo. As secções mais comuns são as “C”, “Z” e “Σ”, que podem ser simplesmente lisas, isto é, sem reforços, ou reforçadas nas

extremidades, ou em pontos intermédios. O número de dobras e as dimensões de altura e espessura a adotar são fatores que condicionam a geometria da secção (Dubina et al., 2012).

2.2.1. Cálculo das características geométricas para secções abertas

O anexo C da parte 1-3 do Eurocódigo 3 (CEN, 2006a) fornece a formulação necessária para a determinação das características geométricas dos perfis enformados a frio com secção transversal aberta. Sugere a divisão da secção transversal em n partes e a inserção de nós entre as mesmas de maneira a facilitar o cálculo (cf. Figura 2.5).

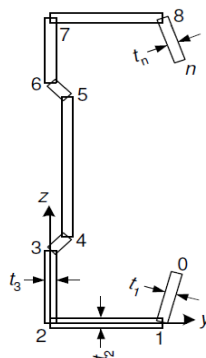


Figura 2.5 - Nós da secção transversal (CEN, 2006a)

2.2.2. Influência dos cantos redondos

O princípio fundamental dos perfis enformados a frio é o de efetuar um determinado número de dobras em chapas de aço para aumentar a sua resistência, tendo como contrapartida que cada dobra tem um custo associado. Deste modo, os perfis são constituídos por secções planas e zonas arredondadas. A existência destas zonas faz com que os elementos enformados a frio possuam uma geometria complexa (Young&Ellobody, 2007). De maneira a simplificar a determinação da geometria e das propriedades geométricas destes elementos procedem-se a algumas simplificações. O cálculo aproximado baseia-se numa linearização por troços retos da linha média da secção (Veríssimo, 2008).

A parte 1-3 do Eurocódigo 3 (CEN, 2006a) apresenta duas formas de obtenção desta secção aproximada: a secção bruta idealizada e a secção bruta nominal. Este tipo de

aproximações acarreta erros, sendo insignificantes para espessuras e raios de encurvadura pequenos (Dubina et al., 2012).

Nos casos em que a influência dos cantos curvos não seja elevada, as propriedades dos elementos relacionadas com a A_{eff} , $I_{y,eff}$, $I_{w,eff}$, e desde que as larguras dos elementos planos sejam medidas a partir dos pontos de interseção dos eixos de referência, podem ser calculadas através das seguintes expressões (CEN, 2006a):

$$A_g \approx A_{g,sh} \cdot (1 - \delta) \quad (1)$$

$$I_g \approx I_{g,sh} \cdot (1 - 2\delta) \quad (2)$$

$$I_w \approx I_{w,sh} \cdot (1 - 4\delta) \quad (3)$$

$$\delta = 0.43 \cdot \frac{\sum_{j=1}^n \frac{\phi_j}{90^\circ} \cdot r_j}{\sum_{i=1}^m b_{p,i}} \quad (4)$$

Com,

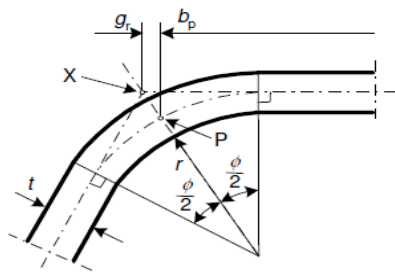
- m = nº de elementos planos; n = nº de elementos curvos e ϕ = ângulo, em graus, entre dois elementos planos.

A influência dos cantos arredondados pode ser desprezada nos casos em que se verifiquem as seguintes condições: $r \leq 5t$ e $r \leq 0,10 b_p$.

A espessura do elemento é dada por t , e b_p é a largura nominal do elemento plano.

Quando o raio interno for $r > 0,04t \cdot E/f_y$, a resistência da secção transversal deve ser determinada por testes (CEN, 2006a).

A secção bruta idealizada consiste na identificação de um conjunto de pontos P nas zonas dos cantos da secção, através da interseção das linhas médias dos troços retos. A largura de cada uma das paredes retas da secção bruta idealizada corresponde à distância entre dois pontos consecutivos do tipo P (cf. Figura 2.6). Se as condições $r \leq 5t$ e $r \leq 0,10 b_p$ forem satisfeitas a parte 1-3 do Eurocódigo 3 (CEN, 2006a) apenas exige a consideração das larguras idealizadas obrigando, no entanto, a corrigir por um fator δ (determinado através da expressão(4)) as propriedades assim obtidas que estão relacionadas com a rigidez axial e de flexão e constante de empenamento (Veríssimo, 2008) (cf. expressões (1), (2) e (3) .



X – é a intersecção das linhas médias dos troços retos.

P – é o ponto médio das zonas arredondadas.

$$r_m = r + \frac{t}{2}$$

$$g_r = r_m \left(\tan \frac{\phi}{2} - \sin \frac{\phi}{2} \right)$$

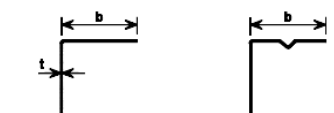
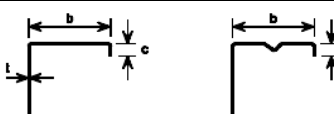
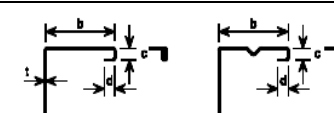
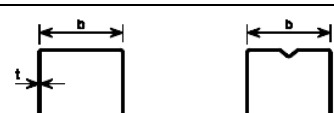
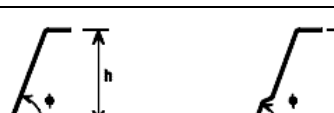
Figura 2.6 - Identificação dos pontos “P” (CEN, 2006a)

2.2.3. Limitações geométricas

O processo de fabrico das secções enformadas a frio proporciona a conceção de secções com uma grande variedade de dimensões, no entanto de modo a proceder ao dimensionamento e à verificação da segurança destes elementos a parte 1-3 do EC3 impõe algumas limitações (cf. Tabela 2.1).

As secções consideradas na realização deste trabalho estão dentro dos limites impostos. Contudo é possível ao projetista utilizar dimensões fora dos limites apresentados, desde que o dimensionamento e a verificação da segurança dos elementos sejam realizados através da realização de ensaios experimentais (CEN, 2006a).

Tabela 2.1 - Limites admissíveis para enformados a frio (CEN, 2006a)

Secção transversal	Limites admissíveis		
	$\frac{b}{t} \leq 50$		
	$\frac{b}{t} \leq 60$	$\frac{c}{t} \leq 50$	
	$\frac{b}{t} \leq 90$	$\frac{c}{t} \leq 60$	$\frac{d}{t} \leq 50$
	$\frac{b}{t} \leq 500$		
	$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$	$\frac{h}{t} \leq 500 \sin \phi$	

2.3.Fenómenos de instabilidade

O comportamento estrutural dos perfis em aço enformado a frio é complexo devido a fatores como: i) esbelteza das secções; ii) assimetria das secções (o centro de corte não coincide com o centro de massa) e iii) imperfeições geométricas da mesma ordem de grandeza das dimensões das peças. Por estes, e por outros, motivos surgem inúmeros fenómenos de natureza diversa que afetam o comportamento estrutural dos enformados a frio (Laím et al., 2013).

A natureza do modo de encurvadura dos perfis enformados a frio depende de um conjunto de fatores, nos quais, o comprimento do elemento, a secção transversal e as condições fronteira (restrições de deslocamentos e rotações existentes nas secções extremas e intermédias) ganham particular importância. Sendo que, os modos de encurvadura podem ser de dois tipos: encurvadura local e encurvadura global (cf. Figura 2.7). Com base na relação entre o comprimento e o comportamento de estabilidade, um perfil pode ser classificado por: “barra curta” se a instabilidade ocorrer num modo local, “barra longa” se a instabilidade ocorrer num modo global e “barra intermédia” se a instabilidade ocorrer numa interação entre locais e globais (modo distorcional) (Veríssimo, 2008).

A elevada esbelteza da secção transversal deste tipo de elementos, potencia a existência de modos de encurvadura local. Estes fenómenos traduzem-se em deformações das paredes da barra, enquanto o eixo longitudinal permanece indeformado. É possível distinguir dois modos de encurvadura local: i) a encurvadura local de placa, associada apenas aos deslocamentos de flexão das paredes do perfil, sem que os bordos longitudinais sofram deslocamentos; ii) e a encurvadura distorcional associada aos deslocamentos da membrana, isto é, provoca deformações nos bordos longitudinais (Camotim&Borges, 2010).

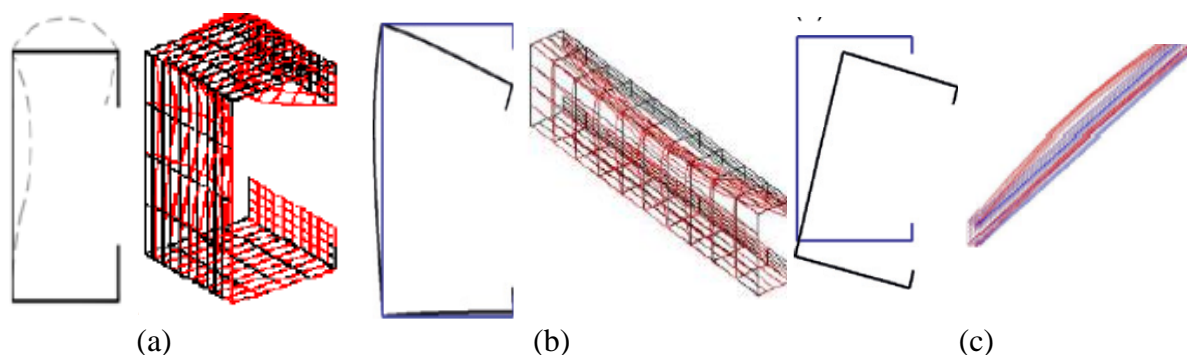


Figura 2.7 - (a) Modo de encurvadura local; (b) Modo de encurvadura distorcional; (c) Modo de encurvadura global (Adaptado de (Camotim&Borges, 2010),(Arrais, 2012))

A análise da encurvadura distorcional é complexa. A partir dos anos 70 começou-se por identificar que a instabilidade distorcional está diretamente ligada à presença dos reforços de extremidade. Surge devido ao facto dos reforços não possuírem rigidez suficiente para impedir o deslocamento da membrana do bordo longitudinal da parede reforçada (canto correspondente ao reforço da secção) (Silvestre&Camotim, 2010). Os modos de encurvadura global encontram-se associados a barras que sejam suficientemente longas e não estejam devidamente contraventadas. São caracterizados pela ocorrência de deformação do eixo da barra, sofrendo as secções transversais, apenas, deslocamentos de corpo rígido no seu plano (Silvestre&Camotim, 2010).

A Figura 2.8 representa os modos de encurvadura numa viga com secção transversal em “C” associada a uma determinada carga crítica. É possível verificar que a encurvadura distorcional (representada pela letra D) apresenta semi comprimentos de onda maiores quando comparado com a encurvadura local (A). Importa ainda referir que a Figura 2.8 diz respeito a uma situação em que o banzo superior está comprimido e o banzo inferior tracionado.

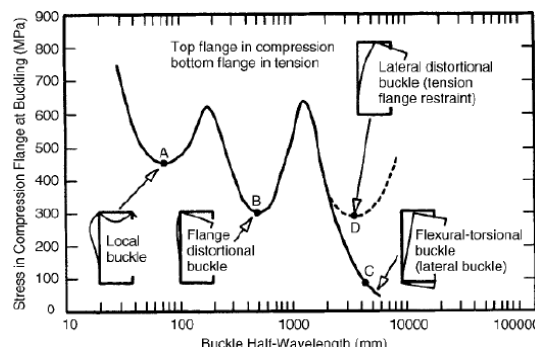


Figura 2.8 - Modos de encurvadura numa viga com secção transversal em “C” (Kankanamge, 2010)

2.4.Cálculo da secção transversal efetiva

O dimensionamento de elementos enformados a frio é realizado com base no método das secções efetivas. Este processo consiste na redução da dimensão de cada um dos elementos da secção transversal por se considerar o efeito da redução da resistência da secção devido à encurvadura local (cf. Figura 2.9) (CEN, 2006a).

A metodologia de cálculo da secção efetiva depende do modo de instabilidade a que o elemento está sujeito. Para fenómenos relacionados com instabilidade local a secção

efetiva é determinada com base no conceito de largura efetiva, sendo que a redução de secção é efetuada na largura do elemento. Para fenómenos relacionados com instabilidade distorcional a secção efetiva é calculada com base no conceito de espessura reduzida e a redução é efetuada na espessura do elemento (reforços) (Arrais, 2012).

A grande maioria dos elementos estruturais de aço enformados a frio é de classe 3 ou 4. Isto é, as secções de aço enformadas a frio podem ter uma resistência elástico-plástica ou elástica (secções de Classe 3 com plasticidade), ou apenas resistência elástica com secção efetiva (secções de Classe 4) (CEN, 2006a).



Figura 2.9 - Resistência à flexão em função da esbelteza (CEN, 2006a)

A classificação da secção transversal vai depender da relação entre a largura e a espessura dos elementos comprimidos ou parcialmente comprimidos sob o carregamento considerado e é classificada segundo a classe mais elevada (menos favorável) desses mesmos elementos. Os valores limite da relação entre as dimensões dos elementos comprimidos das Classes 1, 2 e 3 estão indicados na Tabela 5.2 da parte 1-1 do Eurocódigo 3. Caso um elemento não cumpra os requisitos da Classe 3 é então considerado como sendo de Classe 4 (CEN, 2005a).

2.5. Dimensionamento à temperatura ambiente

2.5.1. Resistência das secções transversais

O processo de fabrico dos perfis enformados a frio conduz à ocorrência do endurecimento nas zonas das dobras, o que conduz ao aumento da tensão de cedência média da secção (cf. Figura 2.10).

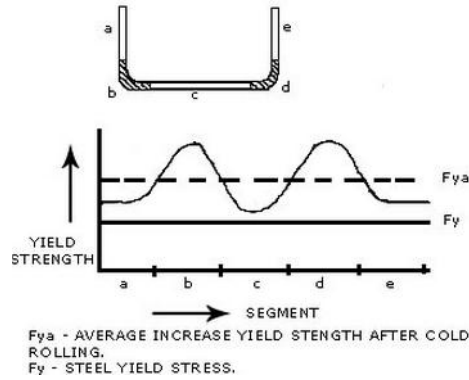


Figura 2.10 - Aumento da tensão de cedência devido ao processo de fabricação dos enformados a frio (Vatsala, 2014)

Deste modo, é usual tirar partido do enrigecimento do aço no dimensionamento das secções. Por isso, utiliza-se um valor médio da tensão de cedência do aço (f_{ya}) cujo valor é superior à tensão de cedência base do aço (f_{yb}). O valor da tensão de cedência do aço, quando os elementos não estejam sujeitos a fenómenos de instabilidade local, pode ser obtido através de (Dubina et al., 2012):

$$f_{ya} = f_{yb} + (f_u - f_{yb}) \frac{knt^2}{A_g} \leq \frac{f_u + f_{yb}}{2} \quad (5)$$

Onde,

- f_u é a tensão última do aço;
- k – é um fator que depende do tipo de enformagem e que toma valor de 7 para laminagem a frio e 5 para outros processos de fabrico (quinagem por exemplo);
- n – é o nº de dobras a 90° com raio interno de dobragem $r \leq t_g$ (t_g é a espessura das chapas de aço antes do processo de dobragem).

Frações de 90° devem ser consideradas com frações de n , em que n é dado por:

$$n = \sum_i n_i \quad (6)$$

$$\text{Sendo, } n_i = \begin{cases} \frac{2\phi_i}{90^\circ} & \text{se } r_i \leq 5 \cdot t_g \\ 0 & \text{se } r_i > 5 \cdot t_g \end{cases}$$

A parte 1-3 do EC3 (CEN, 2006a) estabelece que a resistência das secções transversais, de perfis enformados a frio, sujeitas à flexão simples é dada pela seguinte condição:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (7)$$

Sendo M_{Ed} o valor de cálculo do momento fletor atuante e $M_{c,Rd}$ o valor de cálculo do momento fletor resistente de uma secção transversal em relação a um dos seus eixos principais dado por:

- Se $W_{eff} < W_{el}$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff} * f_{yb}}{\gamma_{M0}} \quad (8)$$

- Se $W_{eff} = W_{el}$

$$M_{c,Rd} = \min \left(\frac{f_{yb} * \left[W_{el} + (W_{pl} - W_{el}) * 4 \left(\frac{1 - \bar{\lambda}_{e \max}}{\bar{\lambda}_{c0}} \right) \right]}{\gamma_{M0}}; \frac{W_{pl} * f_{yb}}{\gamma_{M0}} \right) \quad (9)$$

2.5.2. Resistência do elemento

De acordo com a parte 1-3 do EC 3 (CEN, 2006a) os casos em que exista flexão simples, na ocorrência de encurvadura lateral, a resistência dos elementos deve ser reduzida de forma a ter em conta esse fenómeno de instabilidade, pelo que se deve efetuar a seguinte verificação:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (10)$$

Em que $M_{b,Rd}$ é o valor de cálculo do momento fletor resistente à encurvadura e é dado pela seguinte expressão:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * W_{eff,y} * \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (11)$$

Em que,

- χ_{LT} é o fator de redução da resistência devido à encurvadura lateral de vigas e $W_{eff,y}$ é o módulo de flexão da secção efetiva para momento fletor em torno do eixo principal yy.

O fator de redução é dado por:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1 \quad (12)$$

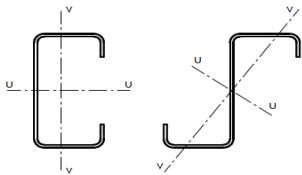
Onde,

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (13)$$

Sendo α_{LT} um fator de imperfeição obtido de acordo com o tipo de secção transversal e com a curva de encurvadura.

A curva de encurvadura de determinado elemento é condicionada pela secção do mesmo. Ao longo deste trabalho vai se dar mais importância a madres de secção em “C” pelo que se apresenta na Tabela 2.2 o tipo de curva de encurvadura correspondente a elementos com esta secção transversal em particular.

Tabela 2.2 - Curva de encurvadura para secções transversais em “C” e “Z” (CEN, 2006a)

Tipo de secção	Eixo de Encurvadura	Curva de encurvadura
	Qualquer	b

Uma vez que os fatores de imperfeição lateral dependem do tipo da curva de encurvadura, a Tabela 2.3 sintetiza a variação do fator de imperfeição α_{LT} em função da curva de encurvadura.

Tabela 2.3 - Valores recomendados dos fatores de imperfeição para as curvas de encurvadura lateral

Curva de encurvadura	a	b	c	d
Fator de imperfeição α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

A esbelteza normalizada relativa ao modo de instabilidade lateral é dada por:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{eff,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} \quad (14)$$

O momento crítico elástico para a encurvadura lateral, M_{cr} , baseia-se nas propriedades da secção bruta e tem em consideração as condições de carregamento. No caso de secções que não sejam bissimétricas (situação comum em perfis “C”, “Sigma”, etc.), o valor de M_{cr} deve ser calculado, através de métodos avançados (softwares como o Cast3m por exemplo).

Não é necessário verificar a encurvadura nos casos em que, $\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}$ ou $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}$ (com $\bar{\lambda}_{LT,0} = 2$).

A EN 1993-1-1 define, no capítulo 6 – Estados limites últimos, os coeficientes parciais de segurança γ_M . O γ_{M0} diz respeito à resistência das secções transversais de qualquer classe e toma o valor de 1,0; γ_{M1} refere-se à resistência dos elementos em relação a fenómenos de encurvadura avaliada através de verificações individuais de cada elemento e vale 1,0 (CEN, 2005a).

2.6.Dimensionamento em situação de incêndio

2.6.1. Considerações gerais

O efeito do fogo numa estrutura de aço eleva a temperatura dos elementos que a constituem, reduzindo a sua rigidez e resistência e alterando os deslocamentos e as cargas que as estruturas metálicas suportam. Estas alterações podem provocar a ruína ou colapso, sendo essencial determinar a evolução do campo térmico no regime transiente e ao mesmo tempo determinar o tempo de resistência à solicitação provocada pelo fogo (Ranawaka&Mahendran, 2009),(Pilot, 2011). A ação térmica de um incêndio esta diretamente ligada com a curva temperatura-tempo dos gases quentes no ambiente em chama (Silva&Azevedo, 2009).

Atualmente, os perfis de secções enformadas a frio são usados como suporte de cargas principais em edifício, como vigas de piso de peso leve ou colunas. Tamaña preponderância no sector da construção obrigou os investigadores a debruçarem-se na questão do seu comportamento em situação de incêndio (Li, 2009).

A parte 1-2 do Eurocódigo 3 (CEN, 2005b) recomenda fatores de redução adequados para os perfis laminados a quente e para os perfis enformados a frio com secções de Classe 4 a temperaturas elevadas (Ranawaka&Mahendran, 2009).

Para garantir os objetivos da segurança contra incêndio em estruturas metálicas devem-se considerar, por ordem decrescente de importância, a proteção das vidas humanas em caso de sinistro, a proteção dos bens existentes no edifício e das atividades a desenrolar no mesmo, a proteção da estrutura contra danos de incêndios que possam deflagrar nela ou em estruturas vizinhas (Pilot, 2011).

2.6.2. Propriedades mecânicas dos enformados a frio a temperaturas elevadas

Como já foi referido anteriormente, o efeito do fogo numa estrutura de aço eleva a temperatura dos elementos que a constituem alterando as suas propriedades mecânicas.

Parâmetros como a tensão de cedência do aço (f_y), o módulo de elasticidade (E), ou o coeficiente de dilatação térmica (α) desempenham um papel determinante na resistência de cálculo de uma estrutura em situação de incêndio.

As propriedades mecânicas do aço em situação de incêndio devem ser calculadas em função de um fator de redução k_θ (Vila Real, 2003):

$$X_{d,fi} = k_\theta X_k / \gamma_{M,fi} \quad (15)$$

Onde,

- X_k é o valor característico da propriedade mecânica (por exemplo a tensão de cedência ou o módulo de elasticidade longitudinal) à temperatura ambiente;
- k_θ é o fator de redução para obtenção do valor da propriedade mecânica à temperatura θ ;
- $\gamma_{M,fi}$ é o fator parcial de segurança em situação de incêndio. A parte 1-2 do EC3 recomenda a utilização de $\gamma_{M,fi} = 1.0$.

Deste modo, a tensão de cedência à temperatura θ , ou seja $f_{y,\theta}$ é dada em função da tensão de cedência f_y a 20°C por (CEN, 2005b):

$$f_{y,\theta} = k_{y,\theta} * f_y \quad (16)$$

Em secções de classe 4 a tensão de cedência aço corresponde à tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2% em vez da tensão correspondente a uma extensão total de 2% utilizada para os elementos de classe 1, 2 e 3.

Isto é, em vez de se usar $k_{y,\theta}$, usa-se $k_{p,0,2,\theta}$ e deste modo a tensão de cedência do material é dada por (CEN, 2005b):

$$f_{p,0,2,\theta} = k_{p,0,2,\theta} * f_y \quad (17)$$

O módulo de elasticidade longitudinal à temperatura θ é dado em função do módulo de elasticidade E a 20°C por (CEN, 2005b):

$$E_{a,\theta} = k_{E,\theta} * E_a \quad (18)$$

Em que $k_{E,\theta}$ é um fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico à temperatura do aço θ_a atingida no instante t (cf. Figura 2.11).

A parte 1-2 do Eurocódigo 3 (CEN, 2005b) recomenda fatores de redução, para a tensão de cedência e para o módulo de elasticidade, adequados para os perfis laminados a quente e para perfis enformados a frio com secções de Classe 4 a temperaturas elevadas. (Kankanamge, 2010).

A alteração das propriedades dos elementos metálicos enformados a frio em situação de incêndio vai se fazer sentir, quer nos perfis, quer nas chapas perfiladas.

Os fatores recomendados pelo EC3 não são consensuais, por exemplo o anexo nacional 6 da norma francesa, (P22-312-2, 2004), sugere algumas alterações, relativamente ao disposto na parte 1-2 do Eurocódigo 3 (CEN, 2005b), como é perceptível na Tabela 2.4. Sendo que os valores propostos, para o fator corretivo do módulo de elasticidade, na norma francesa são inferiores aos apresentados na parte 1-2 do EC3.

Na realização deste trabalho usam-se os valores preconizados pela parte 1-2 do Eurocódigo 3.

Tabela 2.4 - Fatores de redução para perfis enformados a frio com secções de Classe 4 a temperaturas elevadas

Temperatura do Aço (θ_a , °C)	Fatores de redução para enformados a frio relativos a f_y e E_a			
	Tensão de cedência efetiva $k_{p,0,2,\theta} = f_{p0,2,\theta} / f_y$		Módulo de Elasticidade $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$	
	(CEN, 2005b)	(P22-312-2, 2004) AN6.1	(CEN, 2005b)	(P22-312-2, 2004) AN6.1
20	1.000	1.000	1.00	1.00
100	1.000	1.000	1.00	1.00
200	0.807	0.896	0.90	0.9
300	0.613	0.793	0.80	0.8
400	0.420	0.616	0.70	0.68
500	0.360	0.407	0.60	0.45
600	0.180	0.229	0.31	0.25
700	0.075	0.117	0.13	0.11
800	0.050	0.049	0.09	0.08
900	0.0375	0.037	0.0675	0.06
1000	0.0250	0.025	0.0450	0.04
1100	0.0125	0.013	0.0225	0.02
1200	0.000	0.000	0.0000	0.00

2.6.3. Classificação das secções

No caso em que os perfis metálicos se encontram em situação de incêndio, a classificação das secções transversais deve ser realizada tal como à temperatura ambiente, no entanto o valor reduzido de ε é obtido da seguinte forma (CEN, 2005b):

$$\varepsilon = 0.85 \left(\frac{235}{f_y} \right)^{0.5} \quad (19)$$

Sendo f_y a tensão de cedência do aço a 20°C.

2.6.4. Resistência das secções transversais

De acordo com a parte 1-2 do Eurocódigo 3 (CEN, 2005b) sempre que for requerida às madres de aço enformado a frio resistência mecânica, estas devem ser dimensionadas e construídas de maneira a que mantenham a sua função resistente durante o tempo de exposição ao fogo requerido. O dimensionamento, em situação de incêndio, deve ser feito a partir de uma análise elástica e de acordo com as secções, bruta para a classe 3 e eficaz para a classe 4 (Franssen, J.M&Vila Real, 2010).

O procedimento de cálculo de vigas suscetíveis de encurvar lateralmente é complexo, deve ter em conta diversos fatores, dos quais se destacam: a forma da secção, o grau de contraventamento lateral da viga, o tipo de carregamento, a distribuição de tensões residuais e as imperfeições geométricas iniciais (Vila Real, 2003).

Segundo a parte 1-2 do EC3, no domínio da resistência, o elemento estrutural mantém-se estável durante a ocorrência de um incêndio enquanto se verificar a relação (Vila Real, 2003):

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d} \quad (20)$$

Sendo ,

- $E_{fi,d}$ o valor de cálculo do efeito das ações em situação de incêndio;
- $R_{fi,d}$ o valor de cálculo da capacidade resistente em situação de incêndio no instante t.

O valor de cálculo do efeito das ações em situações de incêndio $E_{fi,d}$, deve obter-se com base na combinação de ações (considerando a ação do fogo como uma ação accidental). Pelo que $E_{fi,d}$ pode ser dado por:

$$E_{fi,d} = \eta_{fi} E_d \quad (21)$$

Sendo E_d as ações atuantes à temperatura ambiente e η_{fi} um fator de redução para o valor de cálculo do nível de carregamento em situação de incêndio. A parte 1-2 do Eurocódigo 3 recomenda, como simplificação, a utilização de $\eta_{fi} = 0.65$, excepto para edifícios de categoria E, para os quais recomenda o valor de 0.7 (Vila Real, 2003).

A verificação da segurança pode ser, ainda realizada, no domínio do tempo e da temperatura (Vila Real, 2003).

Nas situações em que existe flexão simples e a distribuição de temperaturas é uniforme, para secções de Classe 4 é necessário proceder à seguinte verificação de segurança da secção transversal (Vila Real, 2003):

$$\frac{M_{fi,Ed}}{M_{fi,\theta,Rd}} \leq 1,0 \quad (22)$$

Onde, $M_{fi,\theta,Rd}$ pode ser obtido através de:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{0,2,p,\theta} M_{Rd} \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} \quad (23)$$

Em que, $k_{0,2,p,\theta}$ é , tal como já foi referido, o fator de redução para o valor de cálculo da tensão de cedência de secções de classe 4 enformadas a frio (cf. Figura 2.11) que corresponde ao limite convencional de proporcionalidade a 0.2 %.

Nota: Na Figura 2.11 $k_{p,\theta}$ corresponde a $k_{0,2,p,\theta}$.

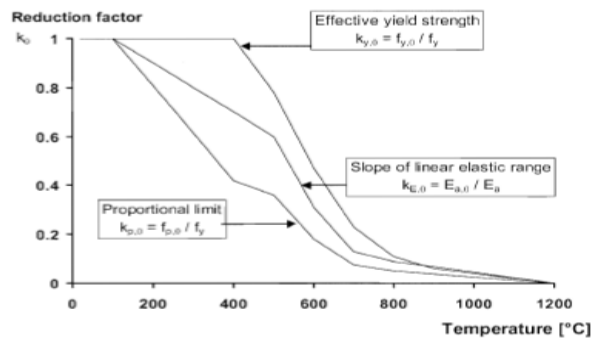


Figura 2.11 - Fatores de redução para a relação tensões-extensões para elementos, em aço carbono, a temperaturas elevadas (CEN, 2005b)

M_{Rd} é o valor de cálculo do momento resistente da secção transversal efetiva à temperatura normal, de acordo com a parte 1-2 do Eurocódigo 3 (CEN, 2005a), pode ser calculado a partir da seguinte expressão:

$$M_{Rd} = \frac{W_{eff,y} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (24)$$

$W_{eff,y}$ é o módulo de flexão de uma secção transversal efetiva

2.6.5. Resistência dos elementos

No caso de madres sujeitas a esforços de flexão simples e com a ocorrência de encurvadura lateral, o momento resistente deve ser reduzido de maneira a ter em conta esse fenómeno de instabilidade. A verificação da segurança é conseguida através da seguinte expressão (CEN, 2005a):

$$\frac{M_{fi,Ed}}{M_{b,fi,t,Rd}} \leq 1,0 \quad (25)$$

Deste modo, e de acordo com a parte 1-2 do Eurocódigo 3 (CEN, 2005a), o valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral é dado por:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} * W_{eff,y} * k_{0,2,p,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (26)$$

Em que,

- $M_{b,fi,t,Rd}$ é o valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral no instante t;
- $\chi_{LT,fi}$ é o coeficiente de redução para encurvadura lateral em situação de incêndio e pode ser obtido através de :

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{(\phi_{LT,\theta})^2 - (\bar{\lambda}_{LT,\theta})^2}} \leq 1,0 \quad (27)$$

Sendo $\phi_{LT,\theta}$ dado por:

$$\phi_{LT,\theta} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta})^2 \right] \quad (28)$$

Em que α é um fator de imperfeição dado por (Vila Real *et al.*, 2004):

$$\alpha = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (29)$$

e,

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{0,2,p,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (30)$$

onde, $k_{E,\theta}$ é um fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico à temperatura do aço θ_a atingida no instante t (cf. Figura 2.11). A esbelteza normalizada para a encurvadura lateral, $\bar{\lambda}_{LT}$, é dada por:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{eff,y} f_y}{M_{cr}}} \quad (31)$$

Em que, M_{cr} é o momento crítico elástico para a encurvadura lateral à temperatura normal (Franssen, J.M&Vila Real, 2010).

CAPÍTULO 3

MADRES RESTRINGIDAS POR CHAPAS PERFILADAS

3. MADRES RESTRINGIDAS POR CHAPAS PERFILADAS

3.1. Considerações gerais

3.2. Dimensionamento à temperatura ambiente

3.2.1. Resistência da secção transversal

3.2.2. Resistência do elemento

3.2.3. Restrição conferida pelas chapas de revestimento ao perfil

3.2.3.1. Rigidez rotacional C_D

3.2.3.2. Rigidez lateral K

3.2.4. Resistência do banzo livre à encurvadura

3.3. Dimensionamento em situação de incêndio

3.3.1. Resistência da secção transversal

3.3.2. Resistência do elemento

3.3.3. Restrição dada pelas chapas de revestimento ao perfil

3.3.4. Resistência do banzo livre à encurvadura

3.4. “Stressed skin design” – Efeito diafragma na resistência ao corte da ligação das chapas de revestimento à madre

3.5. Fatores que condicionam a rigidez conferida pelas chapas aos perfis

3.5.1. Influência da geometria da chapa perfilada

3.5.2. Influência da espessura das chapas

3.5.3. Influência do espaçamento entre conectores

3.5.4. Influência da posição de fixação do perfil à chapa

3.5.5. Influência da secção transversal do perfil

3.5.6. Influência da temperatura

3. MADRES RESTRINGIDAS POR CHAPAS PERFILADAS

3.1.Considerações gerais

Inicialmente o efeito das chapas de revestimento no dimensionamento de perfis era ignorado e as pesquisas sobre os aços enformados a frio incidiam nos fenômenos de encurvadura associados aos perfis (Ye *et al.*, 2002).

Os painéis de chapa e as chapas perfiladas, enformadas a frio, são peças laminares com superfície poligonal, utilizadas em lajes mistas, em estruturas de suporte de paredes, pavimentos e coberturas, cujas dimensões de altura e espessura, respetivamente, variam entre os 20 - 200 mm e os 0.4 - 1,5 mm (Dubina *et al.*, 2012). A secção transversal pode ser ondulada ou trapezoidal (cf. Figura 3.1). Sendo variável a sua altura, o afastamento entre nervuras consecutivas, a espessura e as larguras dos banzos (Martins *et al.*, 2013).

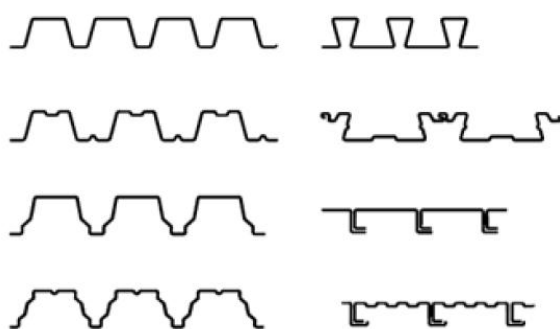


Figura 3.1 - Exemplos de chapas perfiladas (CEN, 2006a)

Compreender a influência que as chapas de revestimento têm no comportamento estrutural das madres enformadas a frio tornou-se num desafio. Simular a interação física das chapas de revestimento com as madres é um processo complexo (cf. Figura 3.2 (a)). Por um lado as madres possuem secções transversais que não são duplamente simétricas o que faz com estes elementos sofram distorções desde o início do carregamento e, por outro, a natureza das ligações entre as chapas e as madres condiciona as restrições ao corte e à rotação proporcionadas pelas chapas, o que faz com que sejam difíceis de quantificar (Lucas *et al.*, 1997).

Ao longo deste trabalho, ainda que de forma exploratória, pretende-se identificar os parâmetros que influenciam a rigidez conferida pelas chapas de revestimento às madres.

Procura-se quantificar, com um caso de estudo concreto, as diferenças produzidas pelo facto de se contabilizar a presença das chapas de revestimento no dimensionamento das madres quer à temperatura ambiente, quer em situação de incêndio. Para tal, foi desenvolvida uma folha de cálculo - no Microsoft Office Excel - com base na formulação preconizada pela parte 1-3 do Eurocódigo 3 capaz de, através da introdução de parâmetros geométricos e parâmetros relativos ao tipo de aço, vãos e condições de apoio, calcular a capacidade resistente do conjunto estrutural madre mais chapa de revestimento.



Figura 3.2 - (a) Modelo do conjunto chapa de revestimento mais madre em “C” (Basaglia et al., 2013); (b) Efeito catenária (Lim&Young, 2007)

3.2. Dimensionamento à temperatura ambiente

3.2.1. Resistência da secção transversal

A parte 1-3 do Eurocódigo 3 (CEN, 2006a) estabelece que em madres sujeitas à ação de um carregamento uniformemente distribuído e a esforços axiais (caso existam) a resistência da secção transversal deve ser verificada para a sobreposição de esforços. Esforços que são: o momento fletor; o esforço axial e a carga equivalente lateral, $q_{h,Ed}$, que atua no banzo livre devido à torção e à flexão lateral do perfil (cf. Figura 3.3).

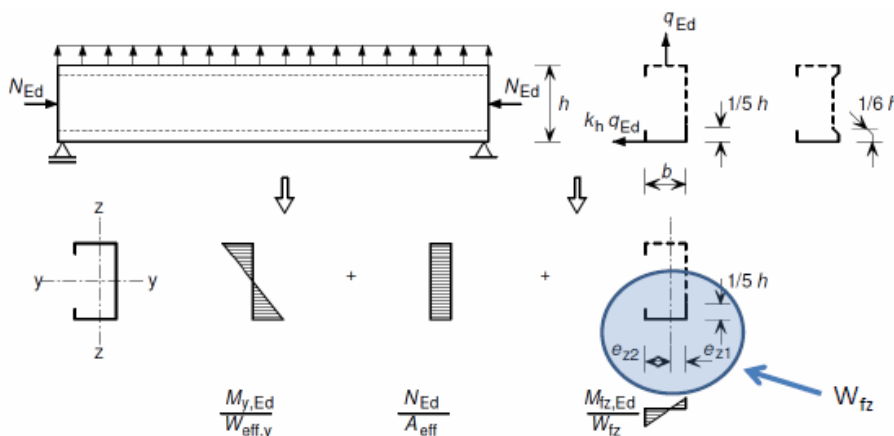


Figura 3.3 - Sobreposição de esforços (CEN, 2006a)

A verificação da resistência deve ser efetuada tanto no banzo restringido pela chapa (verificação comum), como no banzo livre (CEN, 2006a).

Banzo restringido:

$$\sigma_{max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} \leq \frac{f_y}{\gamma_M} \quad (32)$$

Banzo livre:

$$\sigma_{max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} \leq \frac{f_y}{\gamma_M} \quad (33)$$

A verificação do banzo livre contabiliza a influência que as chapas perfiladas têm no dimensionamento dos perfis. O quociente, $\frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}}$, surge devido à torção e à flexão lateral do perfil quando o banzo livre se encontra sujeito a esforços de compressão.

Efetuar esta verificação requer a realização de um conjunto de etapas:

1. Calcular o módulo de flexão lateral em torno de z-z, W_{fz}
2. Converter a torsão e a flexão lateral numa carga lateral equivalente $q_{h,Ed}$
3. Determinar o momento fletor lateral $M_{fz,Ed}$

A cláusula (2) do ponto 10.1.4.1 da parte 1-3 do Eurocódigo 3, (CEN, 2006a), define que o módulo de flexão lateral, W_{fz} , em torno de z-z corresponde ao módulo de flexão lateral de uma secção S_{fz} .

A secção S_{fz} , assim designada por simplicidade escrita (cf. Figura 3.4), é definida pela soma da secção transversal bruta do banzo livre com 1/5 da altura da alma do perfil (para secções em C e Z) (CEN, 2006a).

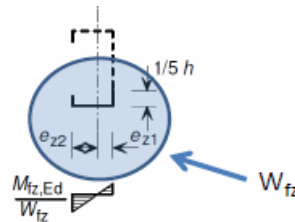


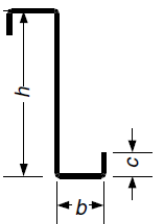
Figura 3.4 - Módulo de flexão lateral, W_{fz} , em torno de z-z

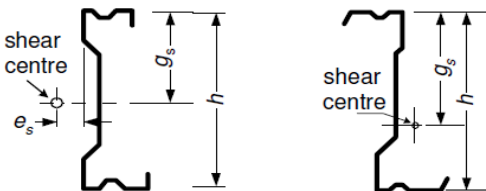
O módulo de flexão lateral, W_{fz} , mede a resistência da secção, S_{fz} , à flexão lateral e é traduzido, segundo a parte 1-3 do Eurocódigo 3, pela seguinte expressão de cálculo (CEN, 2006a):

$$W_{fz} = \frac{I_{fz}}{v} \quad (34)$$

Em que I_{fz} é o momento de inércia da secção S_{fz} e v é a distância do centro de gravidade às fibras comprimidas mais afastadas.

Para converter a torsão e a flexão lateral, a que o perfil está sujeito, numa carga equivalente lateral, $q_{h,Ed}$, tem que se calcular o fator lateral de carga k_{h0} (para carregamentos aplicados no centro de corte dos perfis) através das expressões de cálculo apresentadas na Figura 3.5. O parâmetro k_{h0} depende unicamente das propriedades geométricas da seção transversal (CEN, 2006a).



$$k_{h0} = \frac{ht(b^2 + 2cb - 2c^2b/h)}{4I_y}$$


$$k_{h0} = \frac{I_{yz}}{I_y} \frac{g_s}{h}$$

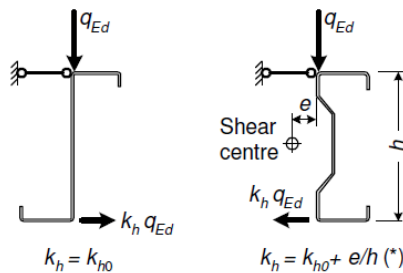
a) Seções em “Z” simplesmente simétricas

b) Seções em “Z”, “C” e “Σ”

Figura 3.5 - Fator de carga lateral k_{h0} , para carregamentos aplicados no centro de corte das seções (CEN, 2006a)

Quando os carregamentos não são aplicados no centro de corte das seções (*shear center*) a parte 1-3 do Eurocódigo 3 (CEN, 2006a) define um fator de carga equivalente, k_h , de modo a corrigir os resultados obtidos para k_{h0} . O fator de carga equivalente depende do sentido do carregamento (cf. Figura 3.6).

Carregamentos descendentes



Carregamentos ascendentes

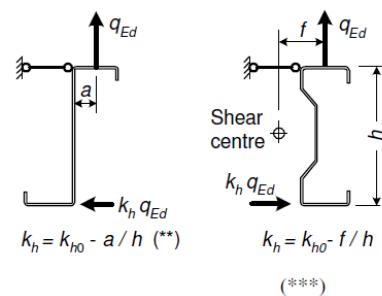


Figura 3.6 - Fator de carga lateral equivalente k_h (CEN, 2006a)

Notas importantes a reter:

(*) se o centro de corte está do lado direito do ponto de aplicação da carga q_{Ed} , então a carga toma sinal contrário ao considerado;

(**) se $a/h > k_{h0}$ significa que a carga está a toma sinal contrário ao considerado;

(***) o valor de f é limitado à posição do ponto de aplicação da carga, q_{Ed} , entre as extremidades do banzo superior (CEN, 2006a).

A carga lateral equivalente, $q_{h,Ed}$, - que surge devido aos fenómenos de torsão e flexão lateral do banzo inferior - é o resultado da conversão, por meio da aplicação de um coeficiente k_h , da carga vertical que atua no banzo superior, numa carga horizontal aplicada lateralmente no banzo inferior (cf. Figura 3.7).

$$q_{h,Ed} = k_h q_{Ed} \quad (35)$$

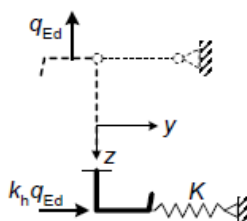


Figura 3.7 - Carga lateral equivalente (CEN, 2006a)

A parte 1-3 do Eurocódigo 3 (CEN, 2006a) estabelece que o momento fletor lateral, $M_{fz,Ed}$, pode ser determinado, exceto para os casos em que o banzo livre esteja tracionado, através da seguinte expressão:

$$M_{fz,Ed} = \kappa_R M_{0,fz,Ed} \quad (36)$$

Nas situações em que o banzo livre está à tração o valor de $M_{fz,Ed}$ deve ser tomado como 0 (cláusula (5) do ponto 10.1.4 da parte 1-3 do Eurocódigo 3 (CEN, 2006a)).

$M_{0,fz,Ed}$ é o momento fletor lateral inicial atuante no banzo livre sem considerar a restrição fornecida pelas chapas de revestimento. O parâmetro κ_R é um fator corretivo que considera a restrição fornecida pelas chapas perfiladas. Ambos dependem das condições de apoio e da continuidade do elemento viga considerado. A Tabela 3.1 fornece a formulação necessária para a determinação dos dois parâmetros (CEN, 2006a)).

Na determinação do fator corretivo, κ_R surge um coeficiente R limitado a 40. Como se pode verificar, através da análise da fórmula (37), o coeficiente R depende do

comprimento do vão, do momento de inercia e do módulo de elasticidade da secção transversal. Depende, também, de um parâmetro K que traduz a restrição, rotacional e lateral, que as chapas perfiladas provocam no banzo livre do perfil (CEN, 2006a). O cálculo do parâmetro K é apresentado no ponto 3.2.2.

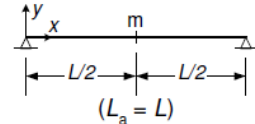
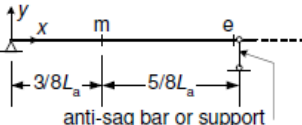
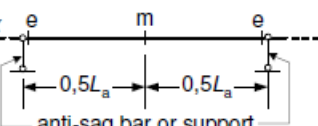
O valor de R é limitado a 40 e é obtido através de:

$$R = \frac{KL_a^4}{\pi^4 EI_{fz}} \quad (37)$$

Onde,

- K é a rigidez lateral, por unidade de comprimento, conferida pelas chapas perfiladas ao banzo livre;
- L_a é a dimensão do vão da viga, se existirem tirantes intermédios corresponde à distância entre tirantes.

Tabela 3.1 - Valores para o momento fletor lateral inicial, $M_{0,fz,Ed}$ e para o fator corretivo K_R (CEN, 2006a))

Sistema	Localização	$M_{0,fz,Ed}$	K_R
<p>Vão simplesmente apoiado</p>  <p>$(L_a = L)$</p>	m	$\frac{1}{8} q_{h,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1 - 0.02255R}{1 + 1.013R}$
<p>Vão de extremidade de viga contínua, com um tirante ou apoio localizado em “e”</p>  <p>anti-sag bar or support</p>	m	$\frac{9}{128} q_{h,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1 - 0.0141R}{1 + 0.416R}$
	e	$-\frac{1}{8} q_{h,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1 + 0.0314R}{1 + 0.396R}$
<p>Vão intermédio de viga contínua, com apoios intermédios ou tirantes, localizados em “e”</p>  <p>anti-sag bar or support</p>	m	$\frac{1}{24} q_{h,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1 - 0.0125R}{1 + 0.198R}$
	e	$-\frac{1}{12} q_{h,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1 + 0.0178R}{1 + 0.191R}$

3.2.2. Resistência do elemento

A parte 1-3 do Eurocódigo 3 não apresenta nenhuma formulação específica para o cálculo da resistência do elemento. O cálculo é semelhante ao da resistência da secção transversal se o elemento estiver, devidamente, restringido lateralmente (CEN, 2006a).

3.2.3. Restrição conferida pelas chapas de revestimento ao perfil

A rigidez fornecida pelas chapas de revestimento à madre é um parâmetro complexo de se abordar, varia consoante o tipo de combinação existente entre a madre e as chapas de revestimento. Depende muito do tipo de configuração adotada, quer para a madre, quer para as chapas, e da interação entre ambas. É simulada considerando um duplo efeito mola. De maneira simplificada, a chapa confere ao banzo superior do perfil rigidez rotacional e ao banzo inferior rigidez lateral, daí o duplo efeito mola (Ye *et al.*, 2004).

Sendo que a restrição rotacional conferida pelas chapas perfiladas ao banzo superior da madre pode ser modelada, de acordo com a parte 1-3 do Eurocódigo (CEN, 2006a), considerando a ação de uma mola a atuar no banzo superior com uma rigidez à rotação C_D (cf. Figura 3.8 (b)). O parâmetro C_D contabiliza a rigidez à rotação conferida pela conexão entre a chapa e o perfil ($C_{D,A}$) e a rigidez rotacional corresponde à rigidez à flexão da chapa perfilada ($C_{D,C}$).

Este modelo considera, ainda, a ação de uma mola com rigidez lateral K . Esta rigidez é conferida pelas chapas perfiladas ao banzo livre da madre e resulta da carga lateral equivalente aplicada, por unidade de comprimento, lateralmente no banzo livre (cf. Figura 3.8 (a)). A restrição conferida pelas chapas aos perfis depende de inúmeros fatores, tais como: as dimensões da secção transversal da chapa e da madre, do número, do tipo e posição dos conectores e da espessura das chapas perfiladas (Li *et al.*, 2012).



Figura 3.8 - Modelos representativos das restrições conferidas pelas chapas perfiladas (CEN, 2006a)

3.2.3.1. Rigidez rotacional C_D

A rigidez rotacional é dada por:

$$C_D = \frac{1}{\left(\frac{1}{C_{D,A}} + \frac{1}{C_{D,C}}\right)} \quad (\text{N.mm/mm}) \quad (38)$$

Em que,

- $C_{D,A}$ é a rigidez à rotação conferida pela conexão entre a chapa e o perfil;
- $C_{D,C}$ é a rigidez à flexão da chapa perfilada.

A rigidez à rotação conferida pela conexão entre a chapa e o perfil é obtida pela seguinte expressão (CEN, 2006a):

$$C_{D,A} = C_{100} \cdot k_{ba} \cdot k_t \cdot k_{bR} \cdot k_A \cdot k_{bT} \quad (39)$$

Os parâmetros da fórmula (39) são calculados através da seguinte metodologia de cálculo:

$$k_{ba} = \left(\frac{b_a}{100}\right)^2 \text{ se } b_a < 125 \text{ mm}$$

$$k_{ba} = 1.25 \left(\frac{b_a}{100}\right) \text{ se } 125 \text{ mm} \leq b_a < 200 \text{ mm}$$

- b_a é a largura do banzo onde é realizada a conexão com a chapa perfilada (cf. Figura 3.9)

$$k_t = \left(\frac{t_{nom}}{0.75}\right)^{1.1} \text{ se } t_{nom} \geq 0.75 \text{ mm; posição positiva}$$

$$k_t = \left(\frac{t_{nom}}{0.75}\right)^{1.5} \text{ se } t_{nom} \geq 0.75 \text{ mm; posição negativa}$$

$$k_t = \left(\frac{t_{nom}}{0.75}\right)^{1.5} \text{ se } t_{nom} < 0.75 \text{ mm}$$

$$k_{bR} = 1.0 \text{ se } b_R \leq 185 \text{ mm}$$

$$k_{bR} = \frac{185}{b_R} \text{ se } b_R > 185 \text{ mm}$$

- O parâmetro b_R é a “largura de onda” da chapa perfilada (cf. Figura 3.9).

Em carregamentos descendentes:

$$k_A = 1.0 + (A - 1.0) * 0.08 \text{ se } t_{nom} = 0.75 \text{ mm; posição positiva}$$

$$k_A = 1.0 + (A - 1.0) * 0.016 \text{ se } t_{nom} = 0.75 \text{ mm; posição negativa}$$

$$k_A = 1.0 + (A - 1.0) * 0.095 \text{ se } t_{nom} = 1.0 \text{ mm; posição positiva}$$

$$k_A = 1.0 + (A - 1.0) * 0.095 \text{ se } t_{nom} = 1.0 \text{ mm; posição negativa}$$

- Sendo A, a carga introduzida pela chapa perfilada na madre ($A \leq 12 \text{ kN/m}$).

- A determinação de k_A , para valores de t_{nom} compreendidos entre 0.75 e 1 mm é efetuada através da interpolação de valores.
- Para $t_{nom} < 0.75$ mm a fórmula não é válida. Para $t_{nom} > 1$ considera-se $t_{nom}=1$. (CEN, 2006a).

Em carregamentos ascendentes:

$$k_A = 1.0$$

$$k_{bT} = \sqrt{\frac{b_{T,max}}{b_T}} \text{ se } b_T > b_{T,max}$$

$$k_{bT}=1 \text{ se } b_T \leq b_{T,max}$$

- b_T é a largura do banzo da chapa onde se efetua a conexão ao perfil.
- O parâmetro t_{nom} corresponde à espessura da chapa perfilada.

A parte 1-3 do Eurocódigo 3 (CEN, 2006a) define os conceitos de posição positiva e negativa da seguinte forma: se a conexão do perfil à chapa for feita no banzo mais curto é considerada conexão em posição positiva (cf. Figura 3.9 (a)). Se a conexão for no banzo mais largo da chapa é considerada conexão em posição negativa (cf. Figura 3.9 (b)).

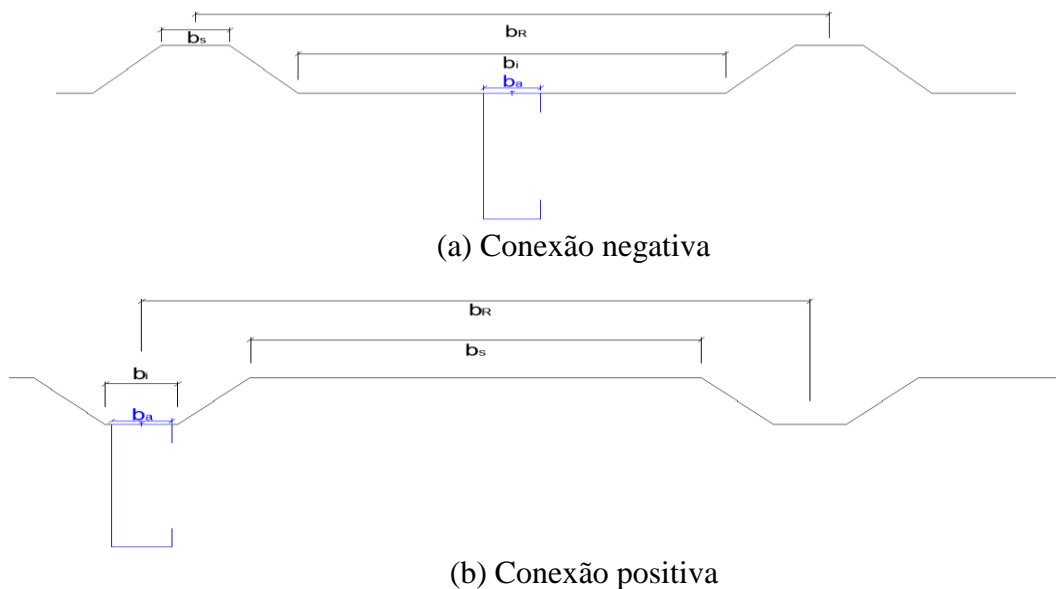


Figura 3.9 - Tipo de conexão chapa perfil

A Tabela 3.2 apresenta os valores para o coeficiente de rotação C_{100} para chapas perfiladas trapezoidais, para situações em que não existem placas de isolamento entre as chapas e as

madres. Apresenta também os valores correspondentes à largura máxima do banzo da chapa perfilada onde é efetuada a conexão ao perfil, $b_{T,max}$. Estes valores variam em função da posição da fixação, do espaçamento e do tipo de conexão.

Tabela 3.2 - Coeficiente de rotação C_{100} e largura $b_{T,max}$ para chapas perfiladas trapezoidais (CEN, 2006a)

Posicionamento da chapa – Tipo de conexão		Fixação do perfil à chapa		Espaçamento entre conectores		Diâmetro da anilha	C_{100}	$b_{T,max}$
Positiva	Negativa	Depressão	Crista	$e=b_R$	$e=2b_R$	(mm)	kN/m	mm
Carregamentos descendentes								
X		X		X		22	5.2	40
X		X			X	22	3.1	40
	X		X	X		Ka	10.0	40
	X		X		X	Ka	5.2	40
	X	X		X		22	3.1	120
	X	X			X	22	2.0	120
Carregamentos ascendentes								
X		X		X		16	2.6	40
X		X			X	16	1.4	40

Os valores da Tabela 3.2 são válidos para:

- Conectores de aço do tipo parafuso com diâmetro igual a 6,3mm
- Anilhas de aço com uma espessura $t_w \geq 1.0$ mm

O valor de K_a corresponde a anilhas do tipo cela com espessura $t \geq 0.75$ mm.

De modo alternativo, a rigidez à rotação conferida pela conexão entre a chapa e o perfil, $C_{D,A}$, pode (CEN, 2006a):

1. Ser considerada igual a $130 \cdot p$ [Nm/m/rad], em que p é o número de conectores existentes por unidade de comprimento de madre, desde que:
 - A largura b do banzo que está conectado à chapa perfilada não exceda os 120 mm;
 - A espessura da chapa perfilada seja pelo menos 0.66 mm;
 - A distância a ou $b-a$ entre o eixo do conector e o centro de rotação da madre (dependendo da direção da rotação) seja pelo menos 0.66 mm (cf. Figura 3.11).

2. Ser determinada através da combinação de testes e cálculos;
3. Se o valor de $\left(\frac{1}{K_A} + \frac{1}{K_B}\right)$ for obtido por testes (em mm/N de acordo com o anexo A.5.3(3) da parte 1-3 do Eurocódigo 3 (CEN, 2006a)), o valor de $C_{D,A}$ pode ser determinado através de :

$$C_{D,A} = \frac{\frac{h^2}{l_A}}{\left(\frac{1}{K_A} + \frac{1}{K_B}\right) - \frac{4(1-\nu^2)h^2(h_d + b_{mod})}{(Et^3 l_B)}} \quad (40)$$

Em que l_A é a largura modular da chapa testada e l_B é o comprimento do vão da madre.

A rigidez à flexão da chapa perfilada, $C_{D,C}$, pode ser considerada como o mínimo valor obtido através dos modelos de cálculo, apresentados na Figura 3.10, de acordo com o sentido das rotações das madres adjacentes e com os graus de continuidade da chapa perfilada. É calculada através de (CEN, 2006a):

$$C_{D,C} = \frac{m}{\theta} \quad (41)$$

Sendo, m o momento aplicado por unidade de largura de chapa e θ o ângulo de rotação resultante, em radianos, da aplicação de m .

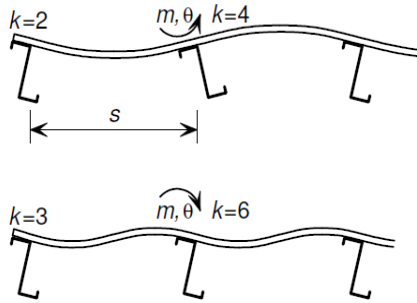


Figura 3.10 - Modelo para o cálculo de $C_{D,C}$ de acordo com a parte 1-3 do EC3 (CEN, 2006a).

De um modo conservativo o valor $C_{D,C}$ pode ser obtido através de:

$$C_{D,C} = \frac{kEI_{eff}}{s} \quad (42)$$

Sendo k um coeficiente numérico que varia de acordo com o caso considerado, tal como é exemplificado na Figura 3.10 (CEN, 2006a).

O espaço entre madres é designado por s , e I_{eff} é o momento de inércia efetivo da chapa perfilada.

A cláusula (8) da secção 10.1.5.2 da parte 1-3 do Eurocódigo 3 (CEN, 2006a) estabelece que sempre que os efeitos de distorção da secção transversal do perfil sejam considerados o valor de $C_{D,C}$ pode ser desprezado, porque a rigidez à rotação é fortemente condicionada pelo valor de $C_{D,A}$ e pelos efeitos de distorção da secção transversal do perfil.

3.2.3.2. Rigidez lateral K

A rigidez lateral, conferida pelas chapas perfiladas ao banzo livre dos perfis, é exemplificada através da ação de uma mola aplicada no banzo livre do perfil (cf. Figura 3.8 (a)) e é determinada através de (CEN, 2006a):

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_A} + \frac{1}{K_B} + \frac{1}{K_C} \text{ (N/mm/mm)} \quad (43)$$

Em que,

- K_A é a rigidez lateral correspondente à rigidez rotacional conferida pela conexão entre a chapa perfilada e o perfil;
- K_B é rigidez lateral devida aos efeitos de distorção da secção transversal da madre;
- K_C é a rigidez lateral devida à rigidez à flexão das chapas perfiladas.

É usual e seguro, desprezar a rigidez lateral devida à rigidez à flexão das chapas perfiladas, K_C . Como o valor de K_C é muito maior quando comparado com K_A e K_B a parcela $\frac{1}{K_C}$ torna-se insignificante (tende para um valor muito inferior, quando comparado com as outras parcelas). Deste modo, a rigidez lateral K por unidade de comprimento pode ser determinada:

1. Através da expressão:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_A} + \frac{1}{K_B} \quad (44)$$

Em que:

$$\frac{1}{K} = \frac{4(1-\nu^2)h^2(h_d+b_{mod})}{(Et^3)} + \frac{h^2}{C_D} \quad (45)$$

O parâmetro b_{mod} depende do sentido da carga e de onde esta é aplicada. Isto é, se a carga lateral equivalente, $q_{h,Ed}$, forçar o contacto da madre com a chapa na zona da alma da madre, a dimensão b_{mod} é dada por: $b_{mod} = a$. Quando a carga $q_{h,Ed}$ força o contacto da

madre com a chapa na extremidade do banzo da madre, a dimensão b_{mod} é obtida através de: $b_{mod} = 2a + b$ (cf. Figura 3.11).

Na expressão (45),

- t representa a espessura da madre;
- a é a distancia da alma do perfil ao eixo do conector;
- b_{mod} é a largura do banzo do perfil que é conectado à chapa;
- C_D é rigidez rotacional determinada em 3.2.2.1;
- h é a altura da secção transversal do perfil;
- h_d é a altura perimetral da alma do perfil.

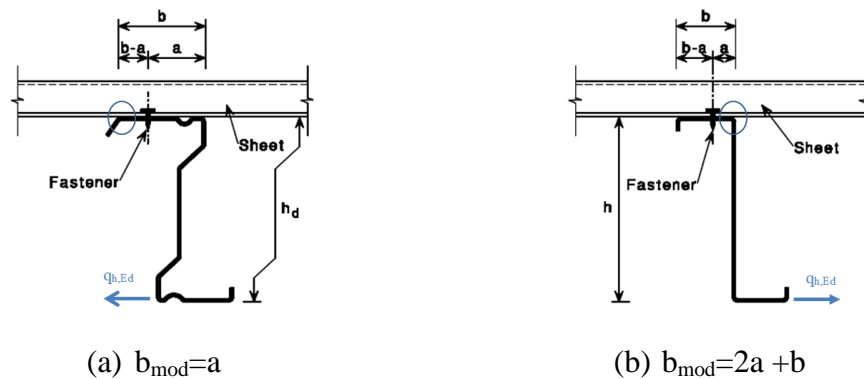


Figura 3.11 - Conexão madre à chapa perfilada (adaptado de (CEN, 2006a)).

2. Através de testes

Os testes mais apropriados estão referenciados no anexo A da parte 1-3 do Eurocódigo 3 (CEN, 2006a).

3.2.4. Resistência do banzo livre à encurvadura

É necessário perceber em que situações o banzo livre está à compressão, pois a resistência do elemento estrutural depende disso (são zonas mais vulneráveis a fenómenos de instabilidade) (Li et al., 2012). Se considerarmos uma viga contínua sujeita a um carregamento gravítico, constata-se que o banzo livre está à compressão na zona dos apoios intermédios. Se o carregamento for ascendente verifica-se que o banzo livre só não

está à compressão na zona dos apoios intermédios (cf. Figura 3.12). Se, se tratar de uma viga simplesmente apoiada, o banzo livre está comprimido para carregamentos ascendentes e tracionado para carregamentos descendentes.

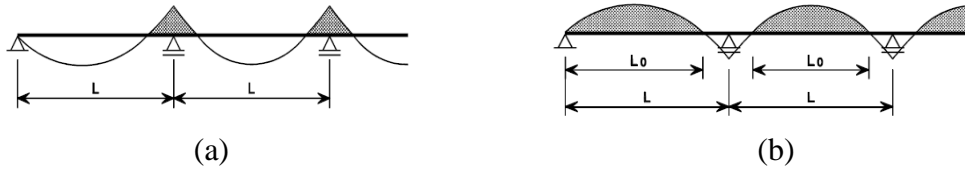


Figura 3.12 - Variação do esforço de compressão no banzo livre numa viga contínua sob a ação de um carregamento; (a) gravítico, (b) ascendente (CEN, 2006a)

A parte 1-3 do Eurocódigo 3 (CEN, 2006a) estabelece a seguinte expressão para se verificar a resistência à encurvadura do banzo livre quando este está à compressão:

$$\frac{1}{\chi_{LT}} \left(\frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} \right) + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} \leq \frac{f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (46)$$

Em que χ_{LT} é o fator de redução para fenómenos de encurvadura lateral no banzo livre (definido na secção 2.5.2). Na determinação do fator de redução para fenómenos de encurvadura lateral no banzo livre, em vez de se calcular a esbelteza normalizada relativa ao modo de instabilidade lateral $\bar{\lambda}_{LT}$, calcula-se a esbelteza relativa para a encurvadura por flexão correspondente ao banzo livre, $\bar{\lambda}_{fz}$ (CEN, 2006a).

$$\bar{\lambda}_{fz} = \frac{l_{fz}}{\lambda_1} \quad (47)$$

Em que,

- i_{fz} é o raio de giração da secção transversal bruta do banzo livre mais a contribuição de 1/5 da altura da alma sujeita a flexão lateral em torno do eixo z-z (cf. 3.2.1)
- $\lambda_1 = \pi \left[\frac{E}{f_{yb}} \right]^{0.5}$
- l_{fz} é o comprimento de encurvadura do banzo livre

A resistência do banzo livre à encurvadura depende do sentido do carregamento. Um dos parâmetros que é afetado pela orientação das cargas e que, por consequente, afeta a resistência do banzo livre à encurvadura é o comprimento de encurvadura l_{fz} .

O comprimento de encurvadura do banzo livre l_{fz} é dado por (CEN, 2006a):

$$l_{fz} = \eta_1 L_a (1 + \eta_2 R^{\eta_3})^{\eta_4} \quad (48)$$

Onde,

- L_a é a distância entre tirantes, se não existirem é a dimensão do vão da viga;
- R é um parâmetro calculado em 3.2.1;

Os coeficientes η_i dependem do número de tirantes. As tabelas Tabela 3.3 e Tabela 3.4 apresentam os coeficientes η_i válidos para vigas com vãos iguais, sujeitas à ação de carregamentos uniformes, sistemas de viga sem sobreposições e em sistemas em que os tirantes intermédios conferem rigidez lateral ao banzo livre. Podem, ainda, ser usadas em sistemas com sobreposições, desde que a conexão na sobreposição seja suficientemente rígida para que o sistema possa ser considerado totalmente contínuo (CEN, 2006a).

Em carregamentos descendentes, se não existirem esforços axiais de compressão e se existirem mais de 3 tirantes igualmente espaçados, o comprimento de encurvadura pode ser calculado considerando a existência de apenas 2 tirantes (usar os coeficientes η_i deste caso), considerando $L_a = L/3$ (CEN, 2006a).

Se a viga estiver sujeita a esforços de compressão constantes ao longo do seu comprimento, devido à aplicação de um esforço axial relativamente grande, o comprimento de encurvadura pode ser determinado usando os valores de η_i da tabela de carregamentos descendentes, correspondentes a uma situação em que se considera 4 tirantes. Mesmo que a viga possua 1, 2 ou até mesmo nenhum tirante. O valor de L_a a usar é o valor correspondente ao espaçamento real entre tirantes (CEN, 2006a).

Em carregamentos ascendentes, quando não existirem tirantes, o comprimento de encurvadura do banzo livre é dado por (CEN, 2006a):

$$l_{fz} = 0.7 L_0 (1 + 13.1 R_0^{1.6})^{0.125} \quad (49)$$

Em que,

- L_0 é o comprimento da viga que está à compressão;
- e R_0 , pode variar entre 0 e 200, é dado por (CEN, 2006a):

$$R_0 = \frac{K L_0^4}{\pi^4 E I_{fz}} \quad (50)$$

Tabela 3.3 - Coeficientes η_i para carregamentos descendentes com 0,1,2,3 e 4 tirantes (CEN, 2006a)

Carregamentos descendentes					
Situação	Nº de tirantes	η_1	η_2	η_3	η_4
Vão de extremidade	0	0.414	1.72	1.11	-0.178
Vão intermédio		0.657	8.17	2.22	-0.1017
Vão de extremidade	1	0.515	1.26	0.868	-0.242
Vão intermédio		0.596	2.33	1.15	-0.192
Vão de extremidade e intermédio	2	0.596	2.33	1.15	-0.192
Vão de extremidade e intermédio	3 e 4	0.694	5.45	1.27	-0.168

Tabela 3.4 - Coeficientes η_i para carregamentos ascendentes com 0,1,2,3 e 4 tirantes (CEN, 2006a)

Carregamentos ascendentes					
Situação	Anti sag-bar nº	η_1	η_2	η_3	η_4
Vão simples	0	0.694	5.45	1.27	-0.168
Vão de extremidade		0.515	1.26	0.868	-0.242
Vão intermédio		0.306	0.232	0.742	-0.279
Vão simples e de extremidade	1	0.8	6.75	1.49	-0.155
Vão intermédio		0.515	1.26	0.868	-0.242
Vão simples	2	0.902	8.55	2.18	-0.111
Vão de extremidade e intermédio		0.8	6.75	1.49	-0.155
Vão simples e de extremidade		0.902	8.55	2.18	-0.111
Vão intermédio	3 e 4	0.8	6.75	1.49	-0.155

3.3. Dimensionamento em situação de incêndio

3.3.1. Resistência da secção transversal

A parte 1-2 do Eurocódigo 3 não contém especificações para o dimensionamento de elementos enformados a frio em situação de incêndio. Deste modo, aplica-se a formulação utilizada no dimensionamento à temperatura ambiente afetada de fatores de redução, para a tensão de cedência e para o módulo de elasticidade, característicos em situação de incêndio.

Banzo restringido:

$$\sigma_{max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} \leq \frac{f_y * k_{p,0,2,\theta}}{\gamma_M} \quad (51)$$

Banzo livre:

$$\sigma_{max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} \leq \frac{f_y * k_{p,0,2,\theta}}{\gamma_M} \quad (52)$$

A verificação do banzo livre contabiliza a influência que as chapas perfiladas têm no dimensionamento dos perfis. O quociente, $\frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}}$, surge devido à torção e à flexão lateral do perfil quando o banzo livre se encontra sujeito a esforços de compressão.

Efetuar esta verificação é um processo semelhante ao realizado à temperatura ambiente, requer um conjunto de etapas intermédias:

1. Calcular o módulo de flexão lateral em torno de z-z, W_{fz}
2. Converter a torsão e a flexão lateral numa carga lateral equivalente $q_{h,Ed}$
3. Determinar o momento fletor lateral $M_{fz,Ed}$

No cálculo do momento fletor lateral ($M_{fz,Ed}$), que surge no banzo livre devido à torção e à flexão lateral do perfil, está contabilizado o efeito da ação das chapas. Um dos parâmetros de cálculo, importante na determinação do momento fletor lateral, é um coeficiente R.

Deve se ter em conta que, em situação de incêndio, o coeficiente R sofre alterações. Uma vez que depende do módulo de elasticidade da secção transversal do perfil e de um parâmetro K que é responsável pela restrição que as chapas perfiladas conferem no banzo livre do perfil (CEN, 2006a).

O valor de R em situação de incêndio é limitado a 40 e é obtido através da seguinte fórmula:

$$R = \frac{KL_a^4}{\pi^4 E * k_{E,\theta} I_{fz}} \quad (53)$$

Onde,

- K é a rigidez lateral, por unidade de comprimento, conferida pelas chapas perfiladas ao banzo livre;
- L_a é a dimensão do vão da viga, se existirem tirantes intermédios corresponde à distancia entre tirantes.

A rigidez lateral K, por unidade de comprimento, conferida pelas chapas perfiladas ao banzo livre em situação de incêndio é obtida através de:

$$\frac{1}{K} = \frac{4(1-\nu^2)h^2(h_d+b_{mod})}{(E*k_{E,\theta}t^3)} + \frac{h^2}{C_D} \quad (54)$$

Os parâmetros envolvidos na expressão já foram devidamente clarificados em 3.2.3.2.

3.3.2. Resistência do elemento

A parte 1-2 do Eurocódigo 3 não apresenta nenhuma formulação específica para o cálculo da resistência do elemento em situação de incêndio. O cálculo é semelhante ao da resistência da secção transversal se o elemento estiver, devidamente, restringido lateralmente (CEN, 2006a).

3.3.3. Restrição dada pelas chapas de revestimento ao perfil

O cálculo da rigidez fornecida pelas chapas de revestimento à madre, em situação de incêndio, é em tudo semelhante ao cálculo para a temperatura ambiente. É preciso ter em atenção sempre que surja o parâmetro E correspondente ao módulo de elasticidade das chapas perfiladas. Este deve ser corrigido através da utilização de um fator de redução $k_{E,\theta}$ adequado. Para uma temperatura θ de 500°C, o fator de redução corresponde é de 0.6 segundo a parte 1-2 do Eurocódigo 3 (CEN, 2005b) e de 0.45 segundo a norma francesa (P22-312-2, 2004).

3.3.4. Resistência do banzo livre à encurvadura

A parte 1-3 do Eurocódigo 3 (CEN, 2006a) estabelece a seguinte expressão para se verificar a resistência à deformação do banzo livre quando este está à compressão:

$$\frac{1}{\chi_{LT}} \left(\frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} \right) + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} \leq \frac{f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (55)$$

Como já foi referido, a parte 1-2 do EC3 não contém especificações para o dimensionamento de elementos enformados a frio, com secção transversal em “C”, a temperaturas elevadas. Pelo que se considera a formulação geral apresentada na referida parte do Eurocódigo 3.

Deste modo, em situação de incêndio, o parâmetro χ_{LT} , deve ser substituído por $\chi_{LT,fi}$.

Em que $\chi_{LT,fi}$ é o coeficiente de redução para encurvadura lateral em situação de incêndio e pode ser obtido através de :

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{(\phi_{LT,\theta})^2 - (\bar{\lambda}_{LT,\theta})^2}} \leq 1,0 \quad (56)$$

Sendo $\phi_{LT,\theta}$ dado por:

$$\phi_{LT,\theta} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta})^2 \right] \quad (57)$$

Em que α é um fator de imperfeição dado por (Vila Real et al., 2004):

$$\alpha = 0.65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (58)$$

e,

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{0,2,p,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (59)$$

Na determinação do fator de redução para fenómenos de encurvadura lateral no banzo livre, em situação de incêndio, em vez de se calcular a esbelteza normalizada relativa ao modo de instabilidade lateral $\bar{\lambda}_{LT}$, calcula-se a esbelteza relativa para a encurvadura por flexão correspondente ao banzo livre, $\bar{\lambda}_{fz}$.

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{fz} \sqrt{\frac{k_{0,2,p,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (60)$$

onde, $k_{E,\theta}$ é um fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico à temperatura do aço θ_a atingida no instante t . A esbelteza relativa para a encurvadura por flexão correspondente ao banzo livre $\bar{\lambda}_{fz}$ é dada por (cf. 2.3.4):

$$\bar{\lambda}_{fz} = \frac{l_{fz}}{\lambda_1} \quad (61)$$

A tensão de cedência do aço f_{yb} deve ser afetada pelo coeficiente de redução respetivo ($k_{p,0,2,\theta}$).

Deste modo, a verificação da resistência do banzo livre à encurvadura, em situação de incêndio, é dada por:

$$\frac{1}{\chi_{LT,fi}} \left(\frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} \right) + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} \leq \frac{f_{yb} * k_{p,0,2,\theta}}{\gamma_{M1}} \quad (62)$$

3.4.– “Stressed skin design” – Efeito diafragma na resistência ao corte da ligação das chapas de revestimento às madres

A resistência ao corte da ligação das chapas de revestimento às madres, é abordada duma forma pouco aprofundada neste trabalho, depende do tipo da chapa de revestimento e da dimensão do vão a vencer e não propriamente da secção transversal da madre. É abordada no ponto 10.3 da parte 1-3 do Eurocódigo 3 com o nome de “*stressed skin design*”. O conceito de “*stressed skin*” foi concebido pelo professor Eric Bryan em 1973 e caracteriza a interação entre as chapas de revestimento e as madres. Em 1977 foram publicadas as primeiras recomendações europeias para o cálculo de estruturas de aço considerando este fenómeno (Davies, 2006). É um método complexo, é necessário dividir a estrutura em diafragmas retangulares que podem ser definidos de duas maneiras: i) elementos contínuos de extremidade e ii) caminhos para as transmissões de esforços. (cf. Figura 3.13)

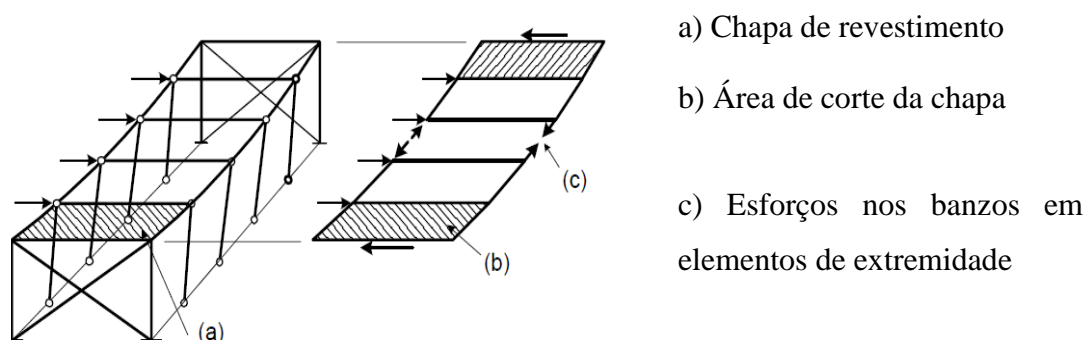


Figura 3.13 - O efeito “Stressed skin” numa cobertura plana (adaptado(CEN, 2006a))

Os diafragmas assim obtidos são conhecidos como diafragma tipo viga, podem ser fixos à estrutura de suporte em dois ou quatro lados. Não é recomendável a fixação em dois lados, uma vez que, desta maneira os elementos fixadores na direção perpendicular à extensão da chapa são fortemente solicitados. As chapas de revestimento podem ser dispostas na perpendicular, ou paralelamente ao vão a vencer pelas madres. Um dos objetivos deste método é ter em conta a contribuição da rigidez ao corte que os diafragmas obtidos através das chapas de revestimento conferem às estruturas de cobertura, de pisos ou de paredes. Na Figura 3.14 apresentam-se as duas soluções, os círculos pretos mais pequenos representam os elementos de fixação entre as chapas e os maiores são elementos fixadores das chapas ao suporte, estes são determinantes na resistência ao corte do conjunto. Tanto a força

resistente como a deformação do diafragma é fortemente influenciada pelo desempenho dos elementos fixadores (Davies, 2006).

O ponto 10.3 da parte 1-3 do Eurocódigo 3 define um conjunto de condições para garantir a aplicabilidade do método.

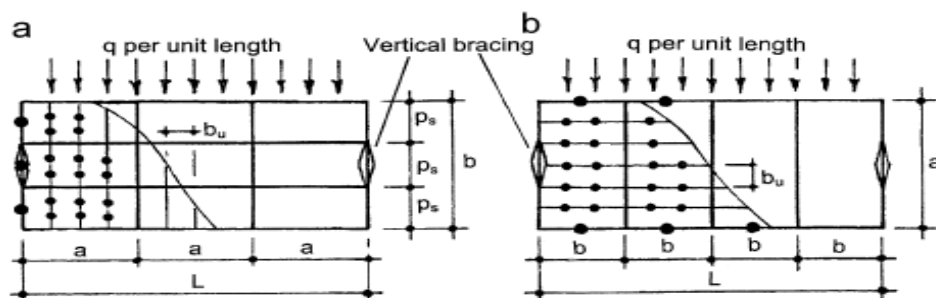


Figura 3.14 - a) Diafragma tipo viga com as chapas de revestimento perpendiculares ao vão; b) Diafragma tipo viga com as chapas de revestimento paralelas ao vão (Davies, 2006)

3.5.Fatores que condicionam a rigidez conferida pelas chapas aos perfis

A rigidez fornecida pelas chapas de revestimento à madre é um parâmetro complexo de analisar, tal com já foi referido, depende de inúmeros fatores, tais como: o tipo de configuração adotada, quer para a madre, quer para as chapas; da espessura das chapas; do espaçamento entre conectores; e da zona de fixação (Li et al., 2012).

Na análise dos parâmetros que condicionam a influência das chapas de revestimentos no dimensionamento dos perfis, considera-se que a secção transversal da madre é do tipo “C110x43x1.5” (perfil comercial da empresa Perfisa (PERFISA, 2014)), que vence um vão simplesmente apoiado de 6 metros e que está sujeita a um carregamento uniformemente distribuído de 1kN/m (variando o sentido do carregamento).

As chapas perfiladas apresentadas são chapas perfiladas comerciais da empresa O Feliz (OFELIZ, 2014).

A Figura 3.15 representa, esquematicamente, a fixação de um perfil com a secção transversal em “C” numa chapa perfilada trapezoidal na zona de depressão da chapa. As dimensões b_R , b_s , b_i e b_a correspondem, respetivamente, à largura do “comprimento de onda” da chapa perfilada, largura do banzo superior da chapa, largura do banzo inferior da chapa e largura do banzo superior do perfil.

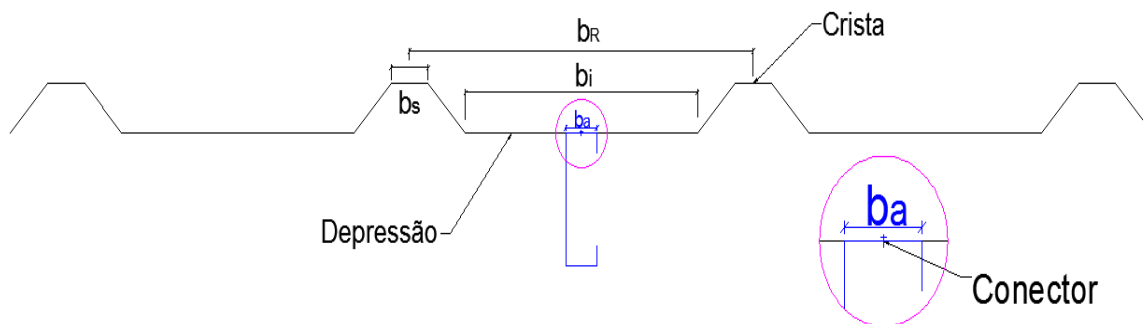


Figura 3.15 - Representação esquemática da interação entre as chapas perfiladas e os perfis metálicos

A Tabela 3.5 sintetiza uma série de configurações, resultantes da interação entre as chapas perfiladas e os perfis, que condicionam a restrição fornecida pelas chapas aos perfis pelo que nos vai servir de base nesta análise.

Tabela 3.5 - Configurações possíveis que condicionam a influência das chapas no dimensionamento dos perfis (adaptado de (CEN, 2006a))








Situação	Posicionamento da chapa – Tipo de conexão		Fixação do perfil à chapa		Espaçamento entre conectores		Diâmetro da anilha	C_{100}	$b_{T,max}$
	Positiva	Negativa	Depressão	Crista	$e=b_R$	$e=2b_R$	(mm)	kN/m	mm
	Carregamentos descendentes								
1	X		X		X		22	5.2	40
2	X		X			X	22	3.1	40
3		X		X	X		Ka	10.0	40
4		X		X		X	Ka	5.2	40
5		X	X		X		22	3.1	120
6		X	X			X	22	2.0	120
Situação	Carregamentos ascendentes								
	Positiva	Negativa	Depressão	Crista	$e=b_R$	$e=2b_R$	(mm)	kN/m	mm
	Carregamentos ascendentes								
7	X		X		X		16	2.6	40
8	X		X			X	16	1.4	40

3.5.1. Influência da geometria da chapa perfilada

As chapas perfiladas do tipo “P4-76-20” e do tipo “P5-111-25”, para as mesmas espessuras e nos diferentes estudos considerados, são as que apresentam valores mais altos de C_D e K , isto é, são as chapas perfiladas que conferem maior restrição rotacional e lateral. Isto acontece porque a formulação a montante favorece os casos em que as chapas apresentem

“comprimentos de onda menores”, por outras palavras, valores de b_R inferiores a 185mm (cf. Tabela 3.6 e cf. Formulação apresentada na secção 3.2.3.1).

Tabela 3.6 - Características geométricas das chapas perfiladas comerciais da empresa O Feliz (OFELIZ, 2014)

Chapas Perfiladas	b_R (mm)	b_s (mm)	b_i (mm)	Ilustração
P0-272-30	272	30	187	
P1-272-30	272	30	187	
P2-272-30	272	30	187	
P3-205-60	205	100	60	
P4-76-20	76	23	23	
P5-111-25	111	35	35	
P6-247-45	247	35	147	

3.5.2. Influência da espessura das chapas

De maneira a analisar a influência da espessura das chapas perfiladas no ganho de rigidez que estas conferem às madres, considera-se que as chapas podem estar sujeitas a momentos fletores atuantes positivos e negativos. Ambos os banzos podem estar comprimidos. Todos os outros parâmetros que condicionam o cálculo de C_D e K são fixos.

Os gráficos apresentados na Figura 3.16 e na Figura 3.17 traduzem, respetivamente, o comportamento do parâmetro C_D e do parâmetro K , quando as chapas estão sujeitas a um carregamento ascendente (banzo livre comprimido), em função da variação da espessura das chapas perfiladas. De referir, que os resultados dizem respeito à configuração definida na situação 7 da Tabela 3.5, isto é, uma disposição em que a fixação da chapa ao perfil é executada no banzo mais curto da chapa, “zona de depressão”, a distância entre conectores adotada é de $e=b_R$ e o diâmetro da anilha usada nos conectores é de 16 mm.

Com base na análise e interpretação dos resultados evidenciados nos gráficos da Figura 3.16 e Figura 3.17 é perceptível que a espessura das chapas condiciona, de maneira bastante vinculada, quer a rigidez à rotação que a chapa proporciona ao perfil (C_D), quer a rigidez lateral proporcionada ao banzo livre do perfil. O ganho de restrição é proporcional ao aumento de espessura.

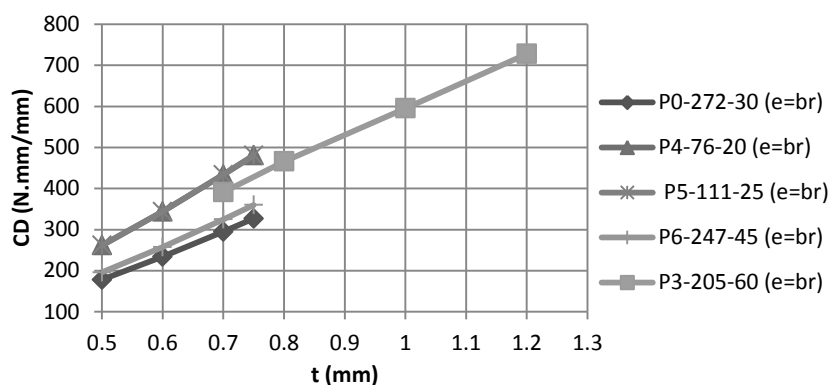


Figura 3.16 - Influência da espessura das chapas perfiladas na rigidez rotacional (C_D) em carregamentos ascendentes

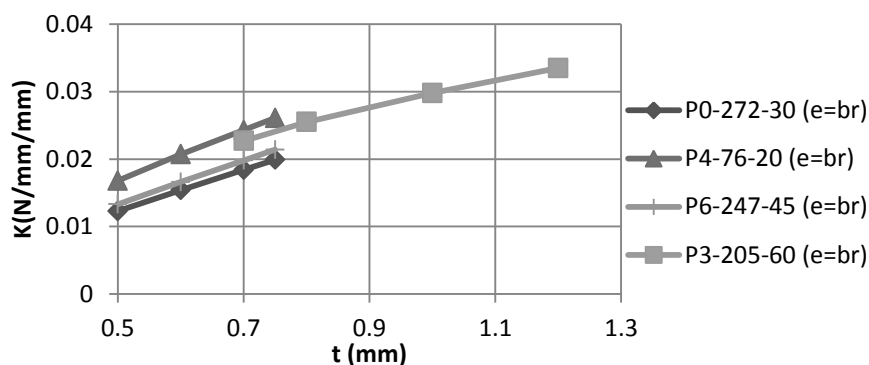


Figura 3.17 - Influência da espessura das chapas perfiladas na rigidez lateral (K) em carregamentos ascendentes

A rigidez lateral (K) é dependente da rigidez rotacional C_D , pelo que se fará, de agora em diante, uma análise vocacionada para a rigidez rotacional. Sabendo, a priori, que o comportamento do parâmetro C_D , espelha o comportamento da rigidez lateral K . Sempre que for necessária uma análise diferencial destes dois parâmetros ela será realizada.

Os resultados apresentados no gráfico da Figura 3.18 apresentam a influência da espessura das chapas de revestimento em carregamentos descendentes e são relativos a uma configuração em que a fixação da chapa ao perfil é realizada no banzo mais curto da chapa, “zona de depressão”, a distância entre conectores adotada é de $e=b_R$ e o diâmetro da anilha usada nos conectores é de 22 mm (situação 1 da Tabela 3.5). É notório um comportamento diferente do parâmetro C_D , quando comparado para a situação de carregamento ascendente, uma vez que o banzo livre (inferior) está tracionado e a fixação se dá no banzo superior (comprimido). Verifica-se, do mesmo modo, um aumento de rigidez rotacional em função do aumento da espessura das chapas, de uma maneira proporcional para espessuras entre

0.5 e 0.7 mm. No entanto, quando se varia a espessura de 0.7 mm para 0.75 mm o acréscimo de rigidez rotacional é significativo (quase que duplica). Este comportamento é justificável com a formulação que está na génese do parâmetro C_D (cf. secção 3.2.3.1). A fórmula utilizada no cálculo de k_A , para carregamentos descendentes só é válida para chapas com espessuras superiores a 0.75 mm. Para espessuras inferiores a 0.75 mm o parâmetro k_A toma o valor 1, que é sempre inferior ao valor que toma para espessuras superiores a 0.75 mm, daí o acréscimo no parâmetro C_D .

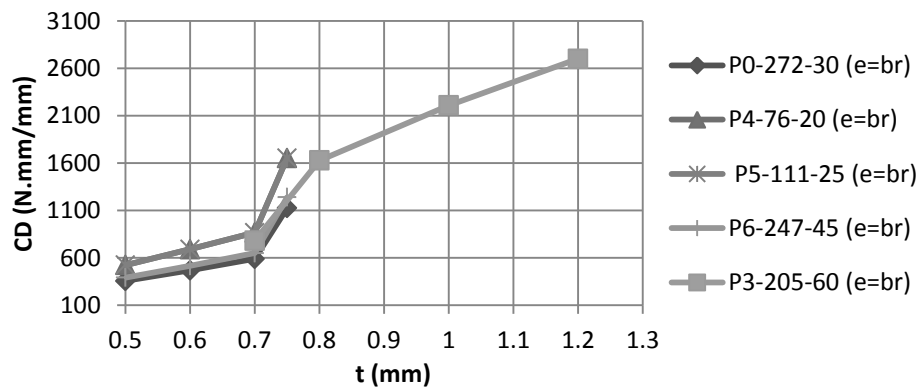


Figura 3.18 - Influência da espessura das chapas perfiladas em carregamentos descendentes

3.5.3. Influência do espaçamento entre conectores

De forma analisar a influência do espaçamento entre conectores no ganho de rigidez que as chapas perfiladas conferem às madres, considera-se que as chapas podem estar sujeitas a momentos fletores atuantes positivos e negativos (fruto da ação de carregamentos, unitários, uniformemente distribuídos). Ambos os banzos do perfil podem estar, ou não, comprimidos. Todos os outros parâmetros que condicionam o cálculo de C_D são fixos.

O gráfico apresentado na Figura 3.19 ilustra a influência do espaçamento entre conetores numa chapa perfilada do tipo “P1-272-30” em carregamentos ascendentes.

As barras mais escura são relativas a uma disposição em que a fixação da chapa ao perfil é efetuada no banzo mais curto da chapa, “zona de depressão”, a distância entre conectores adotada é de $e=b_R$, e o diâmetro da anilha usada nos conectores é de 16 mm (situação 7 da Tabela 3.5). As barras mais claras dizem respeito a uma configuração em que a fixação da chapa ao perfil é executada no banzo mais curto da chapa, “zona de depressão”, a distância entre conectores adotada é de $e=2xb_R$ e o diâmetro da anilha usada nos conectores é de 16

mm (situação 8 da Tabela 3.5). Isto é, as barras mais claras, para as mesmas condições, representam um espaçamento duas vezes superior ao usado para as barras mais escuras.

Pelo que se pode concluir que em carregamentos ascendentes e para mesma espessura de chapa, independentemente da configuração escolhida para a chapa, num espaçamento $e = b_R$ o ganho de rigidez conferido pelas chapas às madres é superior, quando comparado com uma situação em que o espaçamento entre conectores é o dobro $e = 2b_R$

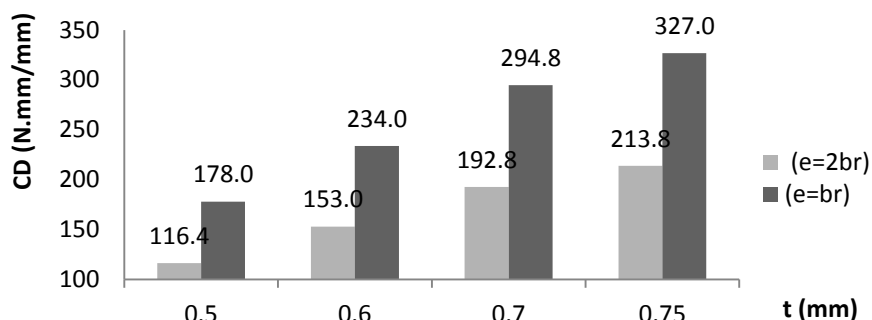


Figura 3.19 - Influência do espaçamento entre conectores em carregamentos ascendentes

Os gráficos da Figura 3.20 traduzem a influência do espaçamento entre conectores em carregamentos descendentes numa chapa perfilada do tipo “P1-272-30”. As barras mais escuras remetem para uma configuração em que a fixação da chapa ao perfil é executada no banzo mais curto da chapa, “zona de depressão”, a distância entre conectores adotada é de $e = b_R$, e o diâmetro da anilha usada nos conectores é de 22 mm (situação 1 da Tabela 3.5). As barras mais claras dizem respeito a uma disposição em que a fixação da chapa ao perfil é realizada no banzo mais curto da chapa, “zona de depressão”, a distância entre conectores adotada é de $e = 2b_R$ e o diâmetro da anilha usada nos conectores é de 22 mm (situação 2 da Tabela 3.5).

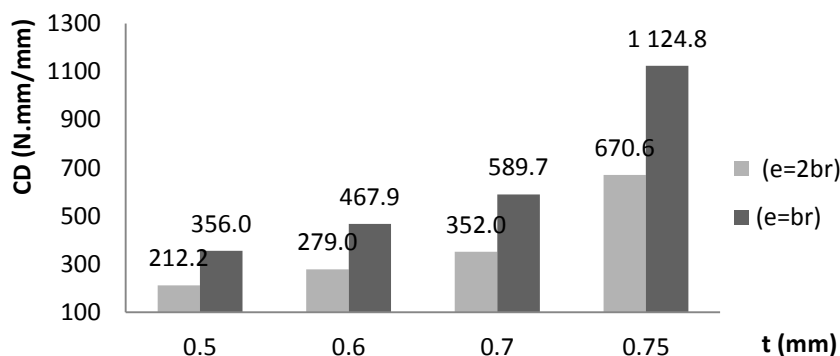


Figura 3.20 - Influência do espaçamento entre conectores em carregamentos descendentes

Mais uma vez é evidente que, quer em carregamentos descendentes, quer em carregamentos ascendentes, o valor de C_D se reduz substancialmente quando o espaçamento entre conectores aumenta. Para a mesma espessura de chapa quando o espaçamento entre conectores dobra, em relação a um espaçamento igual a b_R , o C_D sofre uma redução de 65% (sensivelmente) em carregamentos ascendentes e de 59% em carregamentos descendentes.

3.5.4. Influência da posição da fixação do perfil à chapa

De modo a analisar a influência da posição de fixação do perfil à chapa no ganho de rigidez que as chapas perfiladas conferem às madres, considera-se que as chapas podem estar sujeitas a momentos fletores atuantes positivos e negativos (fruto da ação de carregamentos, unitários, uniformemente distribuídos). Ambos os banzos podem estar comprimidos. Todos os outros parâmetros que condicionam o cálculo de C_D são fixos.

Em carregamentos ascendentes a fixação é sempre feita nas zonas de depressões das chapas perfiladas (cf. Tabela 3.5 e Figura 3.15).

O gráfico da Figura 3.21 ilustra a influência da posição de fixação do perfil nas chapas perfiladas, em carregamentos descendentes, no ganho de rigidez que as chapas perfiladas conferem às madres. É visível que a fixação do perfil na zona da crista da chapa é favorável. Para a mesma chapa perfilada o valor de C_D é maior se a fixação for realizada na zona da crista em vez de ser na zona de depressão da chapa. O ganho de rigidez rotacional ronda os 320 %. Os resultados correspondem a uma chapa perfilada do tipo “P1-272-30”.

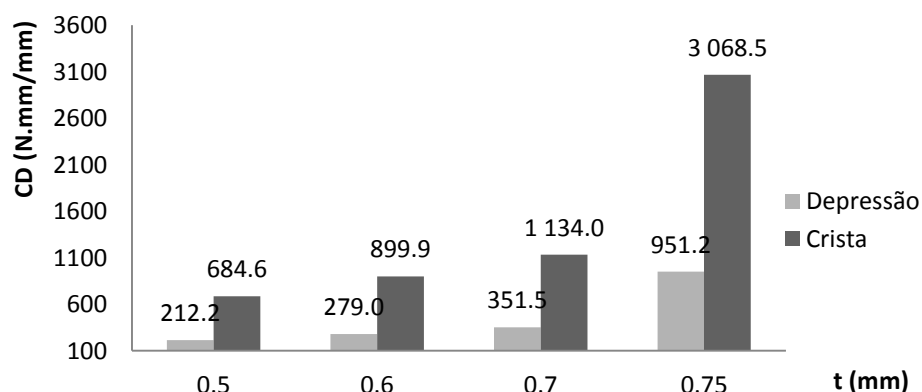


Figura 3.21 - Influência da posição de fixação do perfil nas chapas perfiladas em carregamentos descendentes

3.5.5. Influência da secção transversal do perfil

De maneira a analisar a influência da secção transversal do perfil no ganho de rigidez que as chapas perfiladas conferem às madres, considera-se que as chapas podem estar sujeitas a momentos fletores atuantes positivos e negativos (fruto da ação de carregamentos, unitários, uniformemente distribuídos). Ambos os banzos podem estar comprimidos. Todos os outros parâmetros que condicionam o cálculo de C_D são fixos.

O gráfico da Figura 3.22 ilustra a influência, em carregamentos ascendentes, da secção transversal dos perfis no cálculo parâmetro C_D . Os resultados dizem respeito a uma configuração em que a fixação da chapa ao perfil é executada no banzo mais curto de uma chapa do tipo “P1-272-30”, “zona de depressão”, a distância entre conectores adotada é de $e=b_R$ e o diâmetro da anilha usada nos conectores é de 16 mm (situação 7 da Tabela 3.5). A dimensão da secção transversal dos perfis que condiciona a rigidez rotacional proporcionada pelas chapas é a largura do banzo que está conectado à chapa, no caso é o superior (designada por b_a), (cf. ponto 3.2.3.1 e Figura 3.15).

Quanto maior for a largura b_a maior é o parâmetro C_D . Independentemente da chapa perfilada considerada.

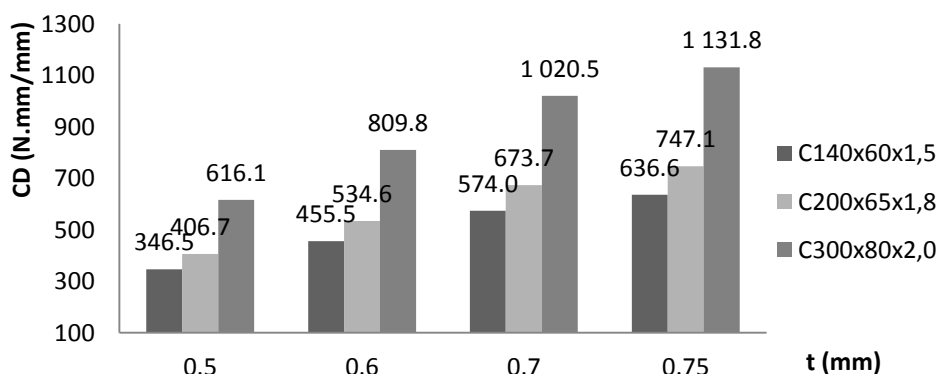


Figura 3.22 - Influência da secção transversal dos perfis em carregamentos ascendentes

A Figura 3.23 representa a influência, em carregamentos descendentes, da secção transversal dos perfis no cálculo parâmetro C_D . Os resultados dizem respeito a uma disposição em que a fixação da chapa ao perfil é realizada no banzo mais curto de uma chapa do tipo “P1-272-30”, “zona de depressão”, a distância entre conectores adotada é de $e=b_R$ e o diâmetro da anilha usada nos conectores é de 22 mm (situação 8 da Tabela 3.5). A dimensão da secção transversal dos perfis que condiciona a rigidez rotacional

proporcionada pelas chapas é a largura do banzo superior (designada por b_a) (cf. ponto 3.2.3.1 e Figura 3.15).

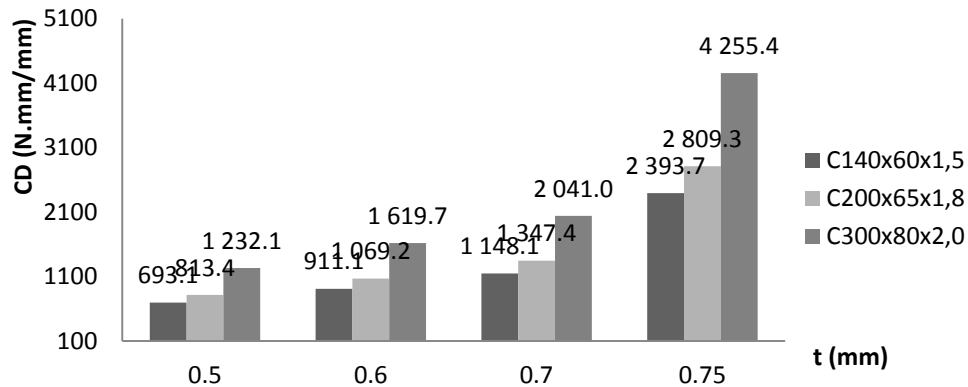


Figura 3.23 - Influência da secção transversal dos perfis em carregamentos descendentes.

3.5.6. Influência de temperaturas de incêndio

De maneira a analisar a influência da temperatura no ganho de rigidez que as chapas perfiladas conferem às madres, considera-se que as chapas podem estar sujeitas a momentos fletores atuantes positivos e negativos (fruto da ação de carregamentos, unitários, uniformemente distribuídos). Ambos os banzos podem estar comprimidos.

O parâmetro C_D , como já foi referido, é calculado através de (CEN, 2006a):

$$C_D = \frac{1}{\left(\frac{1}{C_{D,A}} + \frac{1}{C_{D,C}}\right)} \quad (\text{N.mm/mm}) \quad (63)$$

A temperatura não condiciona diretamente o valor de C_D . No entanto afeta a rigidez lateral conferida pelas chapas ao banzo livre. Como é perceptível na formulação adjacente ao cálculo da rigidez lateral (K) esta depende, de entre outros fatores, do módulo de elasticidade do material que constitui a chapa perfilada. Tal como já foi referido, o módulo de elasticidade da chapa é corrigido por um coeficiente de redução $k_{E,\theta}$ com o valor de 0.45 (cf. Tabela 2.4).

$$\frac{1}{K} = \frac{4(1-\nu^2)h^2(h_d+b_{mod})}{(E*k_{E,\theta}t^3)} + \frac{h^2}{C_D} \quad (64)$$

Como o módulo de elasticidade da chapa é afetado por um coeficiente redutor, característico de uma situação de incêndio, é natural que rigidez lateral conferida pelas chapas a uma temperatura de 500° C seja inferior à obtida para à temperatura ambiente.

O gráfico da Figura 3.24 ilustra o comportamento da rigidez lateral conferida pelas chapas perfiladas aos perfis, numa situação de carregamento ascendente, em função da espessura da chapa para duas situações distintas. As colunas mais escuras dizem respeito ao comportamento da rigidez lateral à temperatura ambiente e as colunas mais claras traduzem o comportamento em situação de incêndio. É possível observar, que a temperaturas elevadas o parâmetro K sofre uma redução na ordem dos 130% e que a redução é mais acentuada para espessuras mais elevadas.

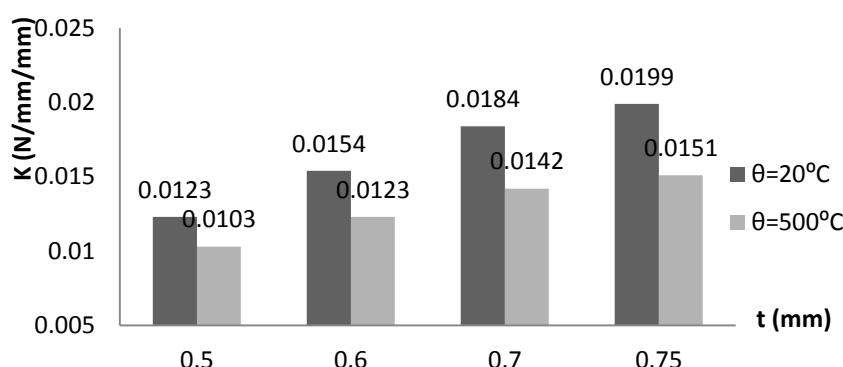


Figura 3.24 - Influência da temperatura, em carregamentos ascendentes, numa chapa perfilada do tipo “P1-272-30”.

No gráfico apresentado na Figura 3.25 apresenta-se o comportamento da rigidez lateral conferida pelas chapas perfiladas aos perfis, numa situação de carregamento descendente, quer à temperatura ambiente, quer em situação de incêndio. O comportamento da rigidez lateral é semelhante ao verificado para a situação de carregamento ascendente. É notório que o valor do parâmetro K toma valores inferiores à temperatura de 500 °C, quando comparado com 20 °C. E que a redução da rigidez lateral aumenta com o aumento da espessura das chapas perfiladas.

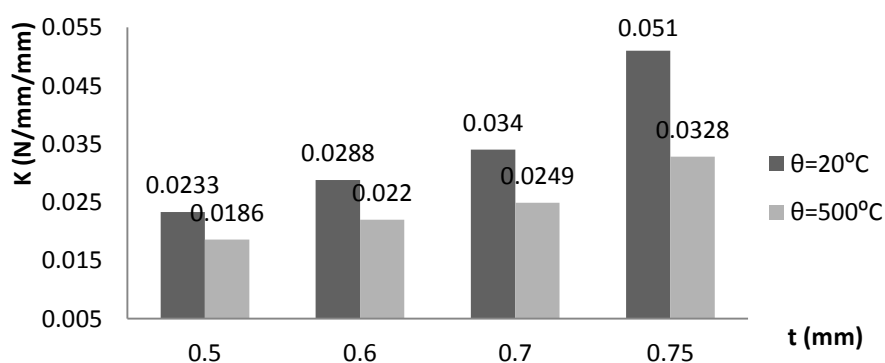


Figura 3.25 - Influência da temperatura, em carregamentos descendentes, numa chapa perfilada do tipo “P1-272-30”.

Para resumir, o valor da rigidez lateral conferida pelas chapas ao banzo livre dos perfis, (K), é sempre inferior em situação de incêndio quando comparado com o que se passa à temperatura ambiente. Independentemente do sentido do carregamento, da geometria da chapa ou do perfil.

CAPÍTULO 4

ESTUDO NUMÉRICO

4. ESTUDO NUMÉRICO

4.1. Considerações gerais

- 4.1.1. Método dos elementos finitos (MEF)
- 4.1.2. Descrição geral do programa SAFIR
- 4.1.3. Descrição geral do programa Cast3m

4.2. Casos de Estudo

- 4.2.1. Propriedades da secção
- 4.2.2. Definição dos modelos numéricos

4.3. Madres enformadas com diferentes graus de liberdade restringidos

- 4.3.1. Modelos numéricos
- 4.3.2. Modos de instabilidade
 - 4.3.2.1. Carregamentos ascendentes
 - 4.3.2.2. Carregamentos descendentes
- 4.3.3. Resistência à encurvadura do elemento isolado
 - 4.3.3.1. Carregamentos ascendentes
 - 4.3.3.1.1. Temperatura ambiente
 - 4.3.3.1.2. Situação de incêndio
 - 4.3.3.2. Carregamentos descendentes
 - 4.3.3.2.1. Temperatura ambiente
 - 4.3.3.2.2. Situação de incêndio
- 4.3.4. Comparação dos resultados obtidos no SAFIR com a formulação preconizada pelo Eurocódigo 3

4.4. Madres enformadas a frio com chapas de revestimento

- 4.4.1. Modelos numéricos
- 4.4.2. Resistência à encurvadura
 - 4.4.2.1. Carregamentos ascendentes
 - 4.4.2.1.1. Temperatura ambiente
 - 4.4.2.1.2. Situação de incêndio
 - 4.4.2.2. Carregamentos descendentes
 - 4.4.2.2.1. Temperatura ambiente
 - 4.4.2.2.2. Situação de incêndio
- 4.4.3. Comparação/discussão de resultados

4. ESTUDO NUMÉRICO

4.1.Considerações gerais

No cálculo estrutural das madres é economicamente vantajoso considerar o efeito do conjunto (madre mais chapa), em vez de se adotar a metodologia tradicional que despreza o efeito das chapas de revestimento no dimensionamento dos perfis. (Basaglia et al., 2013).

A análise estrutural da resistência dos enformados a frio, quer à temperatura ambiente, quer ao fogo pode ser realizada recorrendo a ferramentas de cálculo com diferentes graus de complexidade. Desde programas com base em metodologias simplificadas de cálculo definidos nos Eurocódigos, até a procedimentos complexos de elementos finitos (análise não-linear), presentes nos métodos avançados de cálculo, igualmente incluídos nos Eurocódigos.

Diversos programas de análise de elementos finitos estão disponíveis para fins de investigação. Estes permitem reduzir as excessivas exigências de recursos e de tempo de estudos experimentais na reprodução de comportamentos estruturais complexos com materiais e geometria não-linear (Ranawaka&Mahendran, 2010).

Para a análise numérica deste trabalho, foram utilizados os programas, SAFIR para determinar as cargas últimas dos elementos estruturais e o RUBY para obter as cargas críticas e os modos de encurvadura dos diferentes modelos, conforme se descreve nos pontos que se seguem.

4.1.1. Métodos dos elementos finitos (MEF)

O Método dos Elementos Finitos (MEF) aplica-se às equações diferenciais de equilíbrio ou equações integrais com as respetivas condições de apoio. Este método consiste na divisão do domínio da integração num número finito de pequenas parcelas designadas por “elementos finitos”. A Figura 4.1 ilustra, para o caso de uma viga de parede fina com secção em C, as subdivisões consideradas pelo método dos elementos finitos numa modelação realizada em SAFIR (Arrais, 2012).

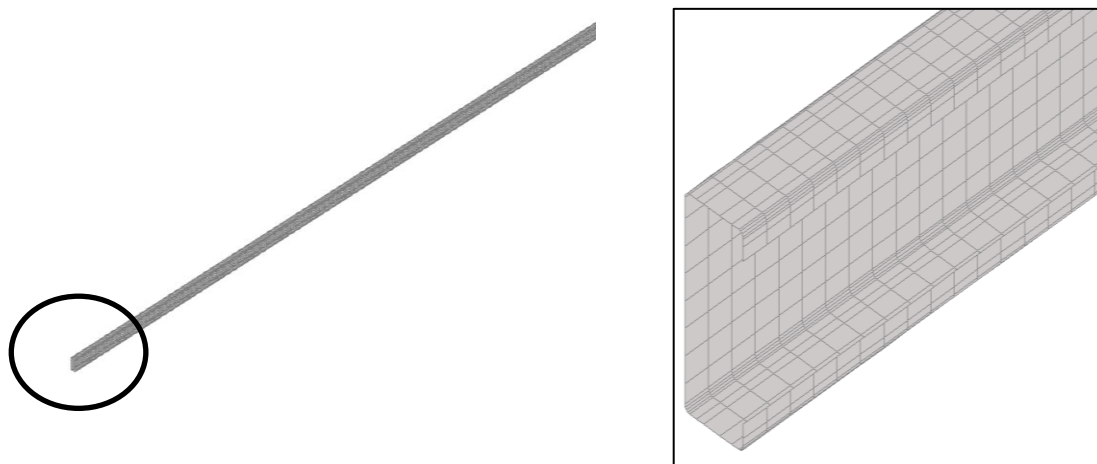


Figura 4.1 - Subdivisões, para um elemento viga, adotadas numa modelação em SAFIR

As imperfeições iniciais do modelo de Elementos Finitos podem ser de duas origens distintas (Beg *et al.*, 2010):

- (i) Imperfeições geométricas, derivadas das tolerâncias na fabricação e construção;
- (ii) Tensões residuais, devido ao processo de fabricação.

Estes dois efeitos podem ser combinados, dum modo simplificado, se se aplicar o método equivalente das imperfeições geométricas. Este método consiste no aumento da amplitude das imperfeições geométricas de modo a englobar as tensões residuais existentes. As imprecisões associadas serão tanto maiores, quanto mais distintas forem as tensões residuais das imperfeições geométricas (Beg *et al.*, 2010).

O anexo C da parte 1-5 do Eurocódigo 3 - Tabela C.2 e Figura C.1 - disponibiliza recomendações para a definição da forma e respetivas amplitudes para algumas imperfeições geométricas (casos menos complexos). Para uma combinação apropriada destas formas, deve ser escolhida uma imperfeição principal (dominante) e a imperfeição que acompanha a anterior deve sofrer uma redução para 70% do seu valor (CEN, 2006b).

4.1.2. Descrição geral do programa SAFIR

O *software* SAFIR é um programa, de análise não linear, que se baseia no Método dos Elementos Finitos. É utilizado, na maior parte dos casos, na análise estrutural, quer à temperatura ambiente, quer a temperaturas elevadas. Foi desenvolvido na Bélgica, na

Universidade de Liège, e por ser um programa de elementos finitos, acomoda vários elementos para diferentes simulações, procedimentos de cálculo e vários modelos de materiais (Franssen, J. M., 2011).

A análise de uma estrutura exposta ao fogo envolve um conjunto considerável de etapas, sendo que o programa incorpora dois blocos de cálculo distintos: um para a análise do comportamento térmico (análise térmica) e outro para a análise do comportamento mecânico da estrutura (análise estrutural). A primeira fase da análise está relacionada com a evolução da temperatura não-uniforme e é calculada na secção existente na estrutura (análise térmica). Posteriormente a parte da análise estrutural elabora a leitura destas temperaturas e determina o comportamento termodinâmico da estrutura numa análise incremental. Os elementos podem ser elementos sólidos 2D (para a análise térmica), elementos sólidos 3D (para a análise mecânica), elementos viga, elementos casca e elementos barra (Franssen, J. M., 2011).

Neste trabalho, para se poder analisar os fenómenos de encurvadura global foram utilizados elementos de casca e elementos viga como elementos finitos.

Na Figura 4.2 é possível visualizar os nós nos elementos de casca ordenados em 1, 2, 3, 4 e os pontos médios das arestas do elemento de casca representados por a, b, c, d. A interseção entre ac e bd é o ponto o que corresponde o centro do eixo de coordenadas x, y e z e existem 4 pontos de integração numa superfície de um elemento de casca. Em cada direção, a integração é elaborada segundo o método de Gauss. O número de integrações na espessura pode ser escolhido pelo utilizador, podendo ir desde as 2 até 9 camadas (Franssen, J. M., 2011).

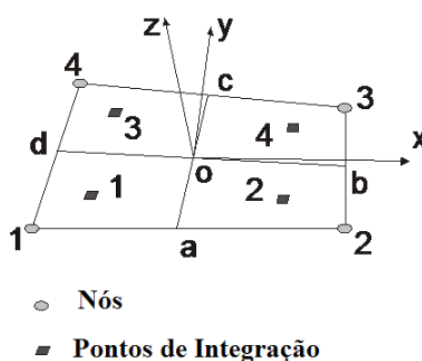


Figura 4.2 - Definição da geometria e dos eixos locais (Franssen, 2011).

Nos elementos de viga optou-se por dividir o elemento em n subelementos iguais, neste caso 4. Na Figura 4.3 os nós ordenados em 1, 2, 3, 4 e 5 delimitam os subelementos, possuem 7 graus de liberdade. Os nós ordenados em 6, 7, 8 e 9 são representativos do centro de gravidade de cada subelemento, são responsáveis pelo deslocamento longitudinal pelo que possuem 1 grau de liberdade. Em cada elemento viga é, ainda, necessário definir um nó adicional, sem qualquer grau de liberdade, responsável pela direção da secção transversal do elemento a modelar.

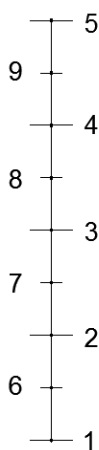


Figura 4.3 - Definição da geometria dos elementos viga

4.1.3. Descrição geral do programa Cast3m aplicado com o RUBY

O *software* usado foi o RUBY que é uma interface do programa Cast3m. O Cast3m é um programa de análise estrutural que se baseia no método dos elementos finitos (MEF) e na modelação mecânica dos fluidos. Inicialmente, o programa foi desenvolvido em estudos mecânicos e térmicos realizados pelo departamento de modelação de sistemas e estruturas da Comissão de Energia Atómica Francesa (CEA). O desenvolvimento deste *software* faz parte de uma atividade de pesquisa no campo da mecânica, a fim de definir um instrumento de alto nível que possa servir como um suporte válido para a conceção, projeto e análise de estruturas e componentes quer no domínio nuclear, quer no setor industrial tradicional (Cast3m).

Qualquer análise genérica que utilize o método dos elementos finitos pode ser dividida em 3 séries de processos elementares (Cast3m):

1. Definição do modelo matemático:

Discretização geométrica do objeto de estudo; definição dos dados que caracterizam o modelo, que incluem: o tipo de análise, o tipo de elementos (vigas, casca, etc.), as propriedades dos materiais as características geométricas que não podem ser deduzidos, a malha e condições fronteira;

2. Resolução do problema discretizado:

Cálculo de matrizes de rigidez, aplicação de cargas externas; aplicação das condições fronteira; resolução do sistema linear de equações de equilíbrio; etc;

3. Análise e tratamento de resultados

4.2. Casos de Estudo

Para os casos de estudo, foram escolhidos elementos de aço de paredes finas de secção de classe 4. Escolheu-se um perfil, comercial da empresa Perfisa, de aço com secção transversal “C110x43x1.5” reforçada nas extremidades com dimensões específicas. Para a chapa perfilada escolheu-se uma chapa comercial da empresa O Feliz do tipo “P1-272-30”. As secções transversais encontram-se representadas na Figura 4.4.

Não existe nenhum motivo em especial para a escolha destas secções transversais. Num trabalho futuro seria interessante analisar outras secções transversais.

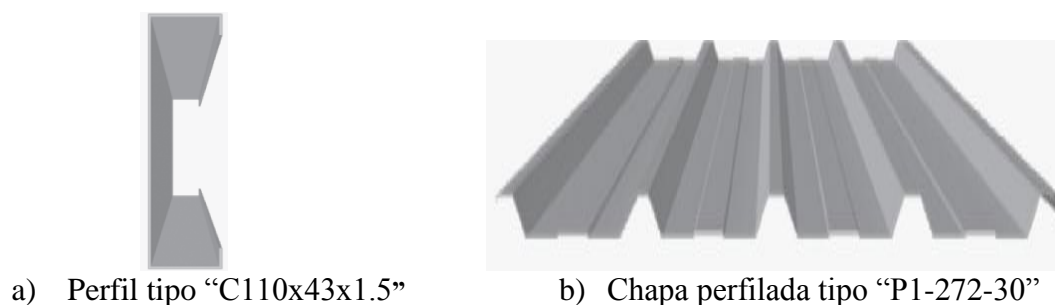


Figura 4.4 - Seções adotadas na modelação numérica

4.2.1. Propriedades da secção

No presente trabalho são considerados os valores correspondentes às secções nominais.

O perfil comercial da Perfisa do tipo “C110x43x1.5” apresenta as dimensões nominais sintetizadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Dimensões da secção bruta real e propriedades da secção bruta efetiva de um Perfil C110x43x1.5

	Dimensões da secção bruta real	
	h (mm)	110.00
	b ₁ =b ₂ (mm)	43.00
	c ₁ =c ₂ (mm)	15.00
	t (mm)	1.50
	Propriedades da secção bruta nominal	
	A (mm) ²	313.90
	y _g (mm)	13.22
	z _g (mm)	54.27
	I _y (mm) ⁴	577693.72
	I _z (mm) ⁴	81464.23
	i _t (mm)	228.39
	Propriedades da secção bruta efetiva	
	A _{eff} (mm) ²	235.84
	y _g (mm)	19.62
	z _g (mm)	54.27
	I _y (mm) ⁴	570872.50
	I _z (mm) ⁴	81464.23
	A _{fz} (mm) ²	116.80
	I _{fz} (mm) ⁴	34240.33

Outras propriedades importantes:

$$W_{\text{eff},y} = 10279.03 \text{ mm}^3$$

$$W_{fz} = 1464.44 \text{ mm}^3$$

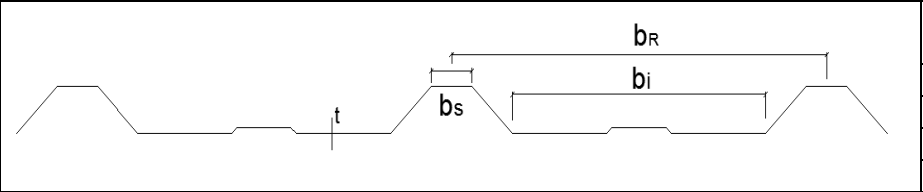
$$I_{fz} = 17.12 \text{ mm}^4$$

e_s = -20.45926 mm. Diz respeito à distância ao centro de corte do perfil.

$$G = 2.48 \text{ kg/m}$$

A chapa comercial da empresa O Feliz do tipo “P1-272-30” apresenta as dimensões sintetizadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Dimensões da secção bruta real de uma chapa perfilada do tipo “P1-272-30”

	Dimensões da secção bruta real	
	b_R (mm)	272.00
	b_s (mm)	30.00
	b_i (mm)	187.00
	t (mm)	0.75
Outras propriedades		G kg/m 6.76

4.2.2. Definição dos modelos numéricos

Neste estudo teve-se em conta a forma de aplicação das cargas, bem como as restrições nos apoios, o refinamento da malha e a tensão de cedência $f_y=320$ MPa. Não se considerou o aumento de tensão de cedência nos cantos devido ao processo de enformagem a frio.

O estudo aqui apresentado é, como já foi referido, uma abordagem exploratória à temática da influência das chapas perfiladas no dimensionamento de madres enformadas a frio. E diz respeito a uma situação de uma viga simplesmente apoiada que vence um vão de 6 metros, sujeita a um carregamento uniformemente distribuído. Por um lado pretende-se demonstrar o comportamento estrutural, a nível de instabilidade, e verificar de que maneira varia a resistência das madres enformadas a frio sem se considerar o efeito das chapas perfiladas. Para isso, vai-se fazer variar a aplicação de determinadas restrições e o sentido do carregamento. Por outro pretende-se analisar o comportamento das madres sujeitas à restrição imposta pelas chapas perfiladas.

Ambas as vertentes são testadas à temperatura ambiente (20°C) e em situação de incêndio (500°C). Os resultados são comparados com os resultados obtidos pela formulação recomendada pela parte 1-3 do Eurocódigo 3. Este estudo requer 5 modelos distintos, 4 para traduzirem o comportamento das madres enformadas a frio sob diferentes condicionantes e 1 para contabilizar o efeito provocado pelas chapas perfiladas.

Na definição dos modelos as condições de apoio foram impostas, sob a forma de restrições, nas extremidades de forma a reproduzir um apoio duplo e outro simples (elementos simplesmente apoiado). A malha do modelo numérico foi refinada de forma a serem obtidos elementos pequenos nas posições onde ocorrem momentos máximos e de elevada deformação, de modo a que o programa SAFIR os possa captar com mais rigor e precisão.

A aplicação das cargas foi um aspeto fundamental a ter em conta de forma a produzir no elemento os efeitos desejados e a não provocar deslocamentos e rotações indesejadas, ou o

impedimento das mesmas. De modo a obter uma distribuição de cargas uniformes aplicaram-se 8 cargas de 0.75 kN, espaçadas de 0.667 m, ao longo dos 6 metros (de modo a perfazer 6 kN de carga), cada uma subdivida em 9 (3 em cada direção x e y) na área de influência da respetiva aplicação tal como é exemplificado na Figura 4.5. Os resultados assim obtidos são muito semelhantes aos conseguidos caso se tivesse optado por uma carga uniformemente distribuída ao longo do vão da viga.

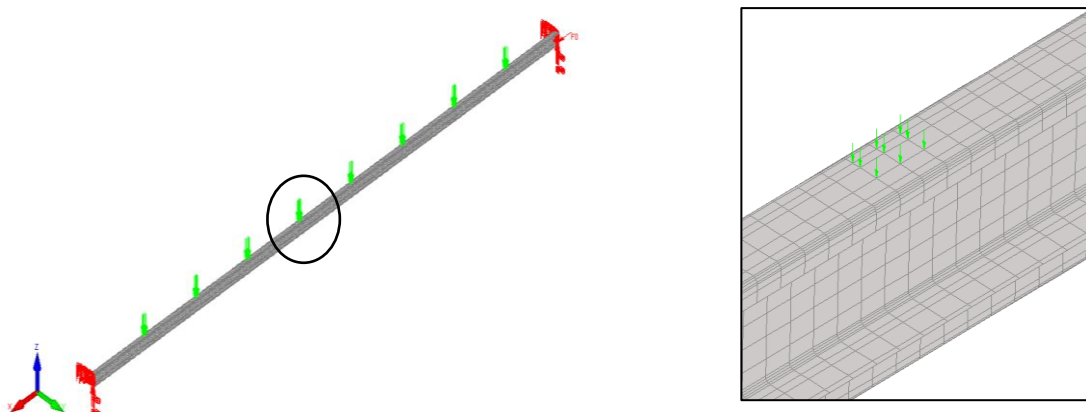


Figura 4.5 - Aplicação das cargas na definição dos modelos numéricos

Para a análise e avaliação da resistência à encurvadura destes modelos, fez-se o estudo dos elementos para as seguintes situações:

- Sem imperfeições geométricas;
- Com imperfeições locais;
- Com imperfeições distorcionais;
- Com imperfeições globais.

4.3. Madres enformadas com diferentes graus de liberdade restringidos

4.3.1. Modelos numéricos

Como já foi referido, no estudo do comportamento de madres enformadas a frio consideram-se 4 modelos sujeitos a restrições distintas. Sendo que o modelo 1 considera apenas a secção transversal do perfil isto é, não possui qualquer restrição adicional, o modelo 2 está restringido lateralmente no banzo superior, o modelo 3 apresenta uma

restrição à rotação segundo o eixo (do elemento) longitudinal $x-x$, e é aplicada, na coordenada y do centro de gravidade (C.G.), do banzo superior.

É importante referir que em carregamentos ascendentes o banzo inferior se encontra comprimido e o superior tracionado. A Figura 4.6 representa os diferentes modelos considerados.

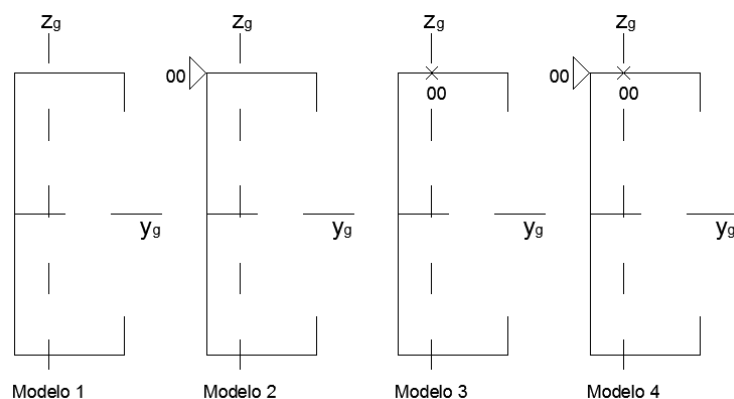


Figura 4.6 - Modelos considerados no estudo de madres enformadas a frio

Na análise realizada para carregamentos descendentes os modelos numéricos considerados são os mesmos. Altera-se, unicamente, o sentido da carga. Passa a ser descendente tal como é ilustrado na Figura 4.7.



Figura 4.7 - Sentido do carregamento

As figuras seguintes (Figura 4.8, Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11) ilustram os modelos adotados com as respectivas condições de apoio, restrições, cargas e refinamento de malha para o estudo numérico da secção transversal em “C” de uma viga simplesmente apoiada.

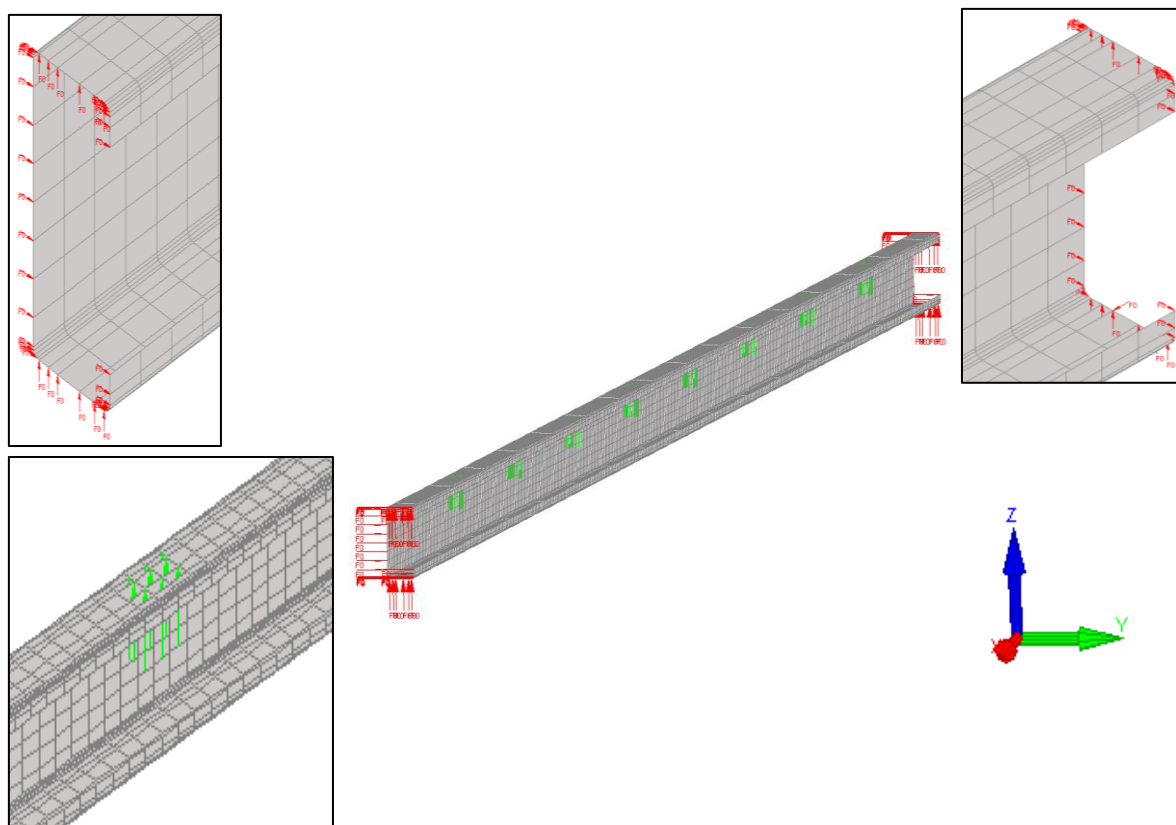


Figura 4.8 - Modelo 1 - Modelo numérico adotado (centro) com as condições de apoio (cantos superiores), aplicação das cargas (canto inferior esquerdo), eixos considerados (canto inferior direito)

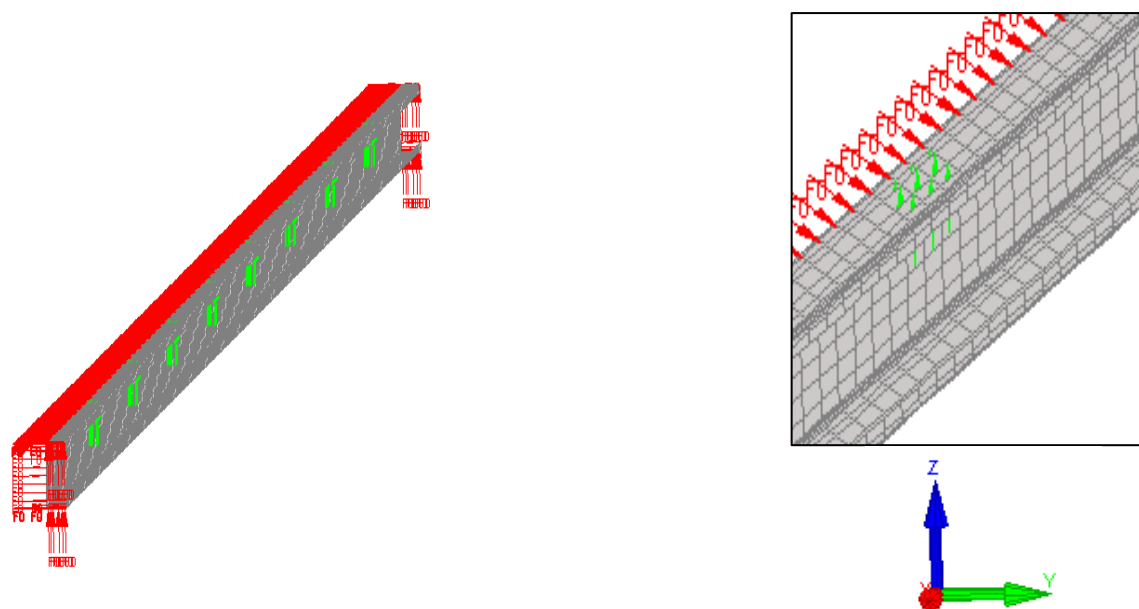


Figura 4.9 - Modelo 2 - Modelo numérico adotado (esquerda), restrição lateral aplicada (canto superior direito), eixos considerados (canto inferior direito)

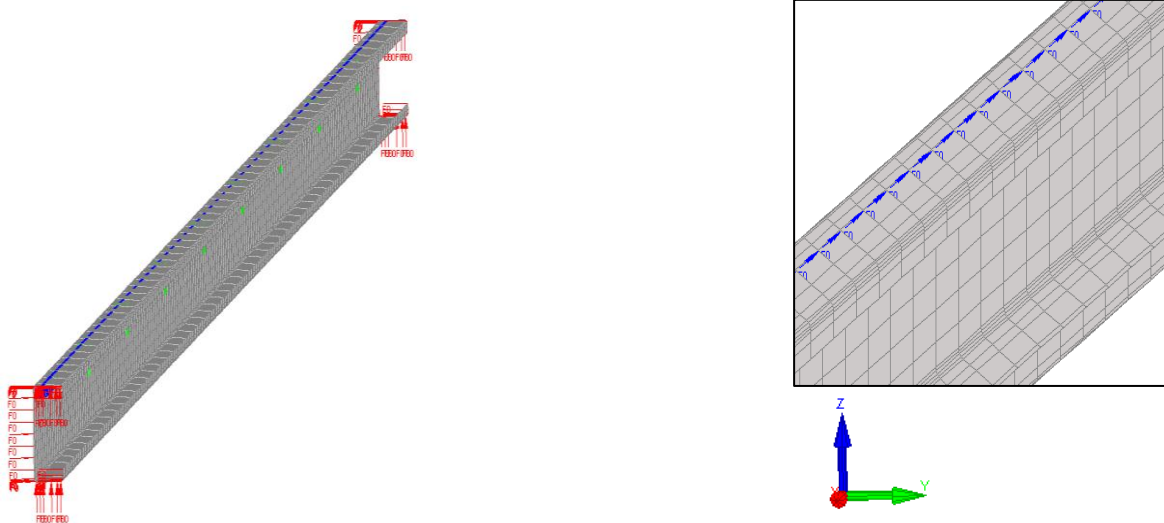


Figura 4.10 - Modelo 3 - Modelo numérico adotado (esquerda), restrições à rotação (canto inferior direito), eixos considerados (canto inferior direito)

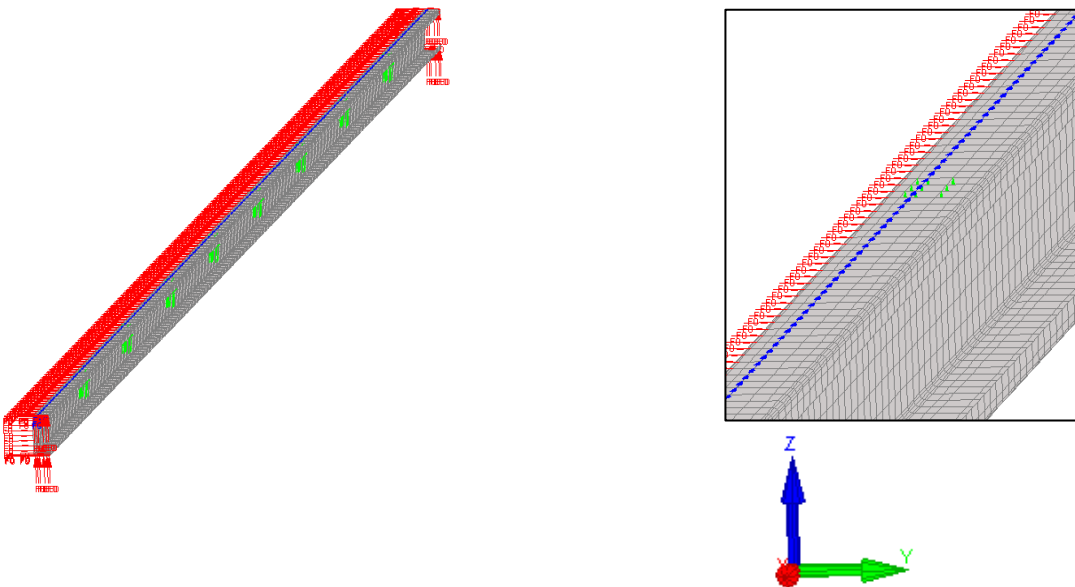


Figura 4.11 - Modelo 4 - Modelo numérico adotado (esquerda), restrições (lateral e à rotação) aplicadas (direita)

Conforme se pode visualizar, foram aplicadas cargas concentradas com a direção perpendicular ao eixo da viga, de acordo com a distribuição linear de tensões resultante da flexão simples em torno do eixo forte. As restrições, que definem as condições de apoio, foram aplicadas em torno de toda a secção na direção do plano vertical que contém a secção transversal das extremidades, de forma a produzir as restrições desejadas sem comprometer o comportamento mecânico pretendido do elemento.

4.3.2. Modos de instabilidade

4.3.2.1. Carregamentos ascendentes

É apresentado de seguida a determinação das cargas críticas e os respetivos modos de instabilidade elástica dos elementos. Não foram tidas em conta quaisquer tipos de imperfeições geométricas iniciais, adotando-se para a lei constitutiva um modelo elástico linear.

A partir do programa RUBY retirou-se informação relativamente aos modos de instabilidade. Obtiveram-se 10 modos de encurvadura para cada modelo, sendo que o modo de encurvadura que interessa na determinação da carga crítica, é o primeiro modo de encurvadura.

A Tabela 4.3 sintetiza os valores obtidos de carga crítica, para o primeiro modo de encurvadura dos diferentes modelos.

Tabela 4.3 - Cargas críticas correspondentes ao primeiro modo de encurvadura para os diferentes modelos (carregamentos ascendentes)

Modelo	RUBY
	$P_{crítico}$
	(N/m)
1	118.25
2	230.59
3	1019.02
4	1539.00

À medida que se acrescentam restrições aos modelos a carga crítica correspondente ao primeiro modo de encurvadura aumenta. Em carregamentos ascendentes é mais efetivo um bloqueio à rotação na direção x-x, aplicado na coordenada y do centro de gravidade no banzo superior, do que uma restrição aplicada lateralmente no banzo superior.

Devido à madre vencer um vão de 6 metros é expectável que o primeiro modo de encurvadura corresponda a encurvadura global. Uma vez que os modos de encurvadura global se encontram associados a barras que são suficientemente longas e indevidamente contraventadas.

Segundo Veríssimo (Veríssimo, 2008) o comportamento de estabilidade, de uma barra com secção de parede fina, conforme foi aplicado neste caso de estudo, pode ser classificado da seguinte forma:

- Barra curta – se a instabilidade ocorrer num modo local;
- Barra intermédia – se a instabilidade ocorrer num modo distorcional;
- Barra longa – se a instabilidade ocorrer num modo global.

No que diz respeito ao modelo 1 a deformação do perfil sugere que a madre considerada apresenta um comportamento de barra longa, isto é instabiliza num modo global. Ocorre deformação do eixo da barra (como é perceptível na Figura 4.12), o que faz com que a secção transversal sofra deslocamentos de corpo rígido no seu plano.

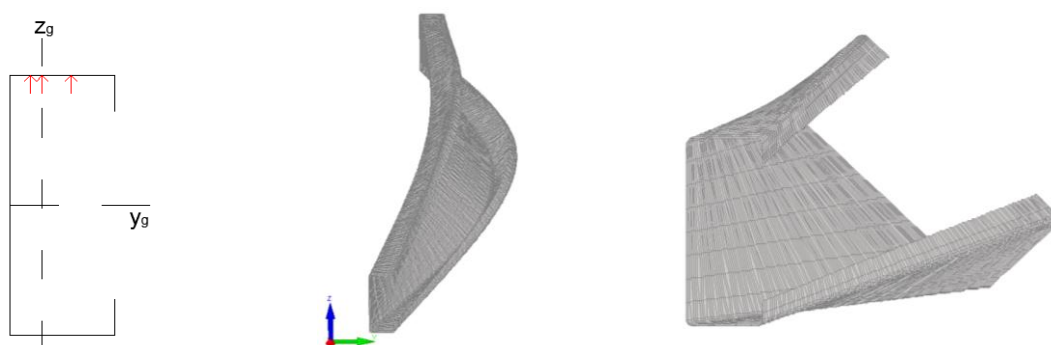


Figura 4.12 - Comportamento de estabilidade do elemento correspondente ao 1º modo de encurvadura (vista frontal) – Modelo 1

No modelo 2, como já foi referido anteriormente, é aplicada uma restrição lateral, com rigidez axial infinita, no banzo superior. Deste modo, o deslocamento para fora do plano (na direção y - y) fica condicionado. Ocorre deformação do eixo da barra (como é perceptível na Figura 4.13) o que faz com que a secção transversal sofra, na alma e no banzo inferior do perfil, deslocamentos de corpo rígido no seu plano (fenómenos de flexão lateral). A deformação apresentada pela secção transversal correspondente ao primeiro modo de encurvadura diz respeito à encurvadura global.

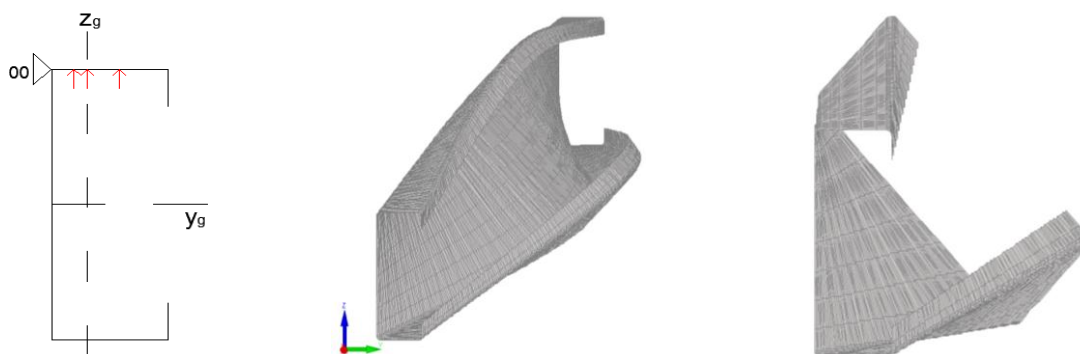


Figura 4.13 - Comportamento de estabilidade do elemento correspondente ao 1º modo de encurvadura (vista frontal) – Modelo 2

No modelo 3 é aplicada uma restrição à rotação na direção $x-x$, na coordenada y do centro de gravidade, com rigidez axial infinita no banzo superior. A restrição aplicada impede o perfil de rodar no banzo superior, como tal sofre um deslocamento para fora do plano e é afetado por fenómenos de torção no banzo inferior e na alma. O comportamento que o perfil apresenta diz respeito a um comportamento de barra longa, a instabilização dá-se de forma global.

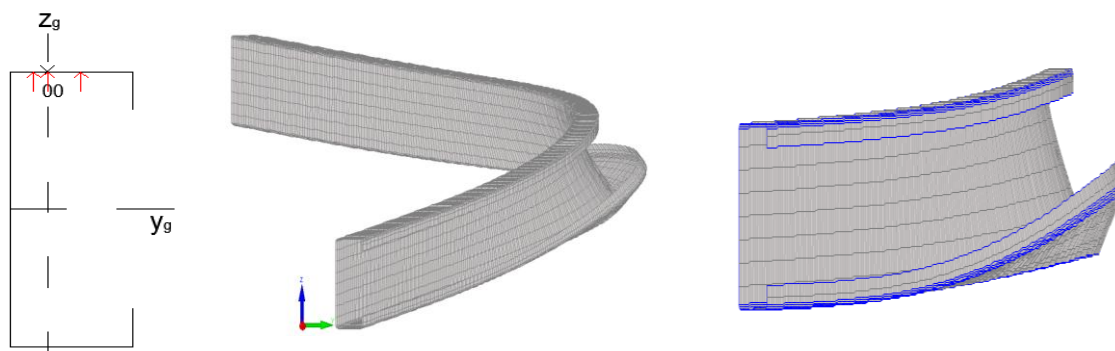


Figura 4.14 - Comportamento de estabilidade do elemento correspondente ao 1º modo de encurvadura (vista frontal) – Modelo 3

No modelo 4 é aplicada uma restrição à rotação na direção $x-x$, na coordenada y do centro de gravidade, e uma restrição lateral com rigidez axial infinita no banzo superior. O banzo superior encontra-se de tal forma restringido que cria tensões na alma e nos banzos do perfil que provocam deformações por torção no plano horizontal e vertical (como é perceptível na Figura 4.15). O que faz com que a secção transversal sofra deslocamentos de corpo rígido em ambos os planos. O perfil sofre de fenómenos de instabilidade distorcional e global.

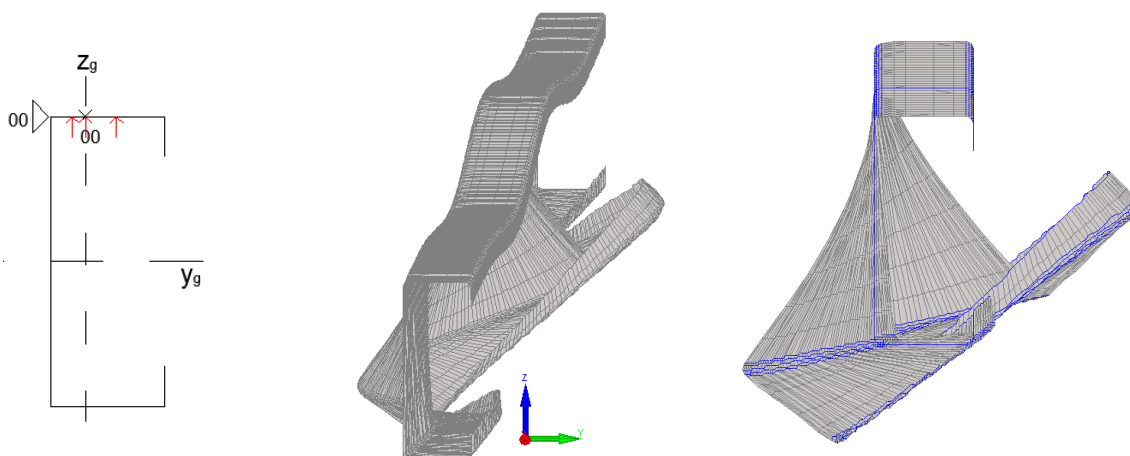


Figura 4.15 - Comportamento de estabilidade do elemento correspondente ao 1º modo de encurvadura (vista frontal) – Modelo 4

4.3.2.2. Carregamentos descendentes

Na determinação do modo de encurvadura em situação de carregamentos descendentes, consideram-se os mesmos pressupostos que em carregamentos ascendentes. A única alteração a levar a efeito diz respeito ao sentido da colocação de cargas (cf. Figura 4.7).

A Tabela 4.4 sintetiza os valores obtidos de carga crítica para o primeiro modo de encurvadura dos diferentes modelos.

Tabela 4.4 - Cargas críticas correspondentes ao primeiro modo de encurvadura para os diferentes modelos (carregamentos descendentes)

Modelo	RUBY
	$P_{\text{crítico}}$
	(N/m)
1	63.75
2	280.13
3	1013.60
4	2497.50

A evolução da carga crítica correspondente ao primeiro modo de encurvadura aumenta do modelo 1 para o modelo 4. Surgindo comportamentos de instabilidade distintos, associados ao primeiro modo de encurvadura, para os diferentes modelos.

No que diz respeito ao modelo 1 a deformação do perfil sugere que o primeiro modo de encurvadura corresponde à encurvadura global. Ocorre deformação do eixo da barra (como é perceptível na Figura 4.16), o que faz com que a secção transversal sofra deslocamentos de corpo rígido no seu plano.

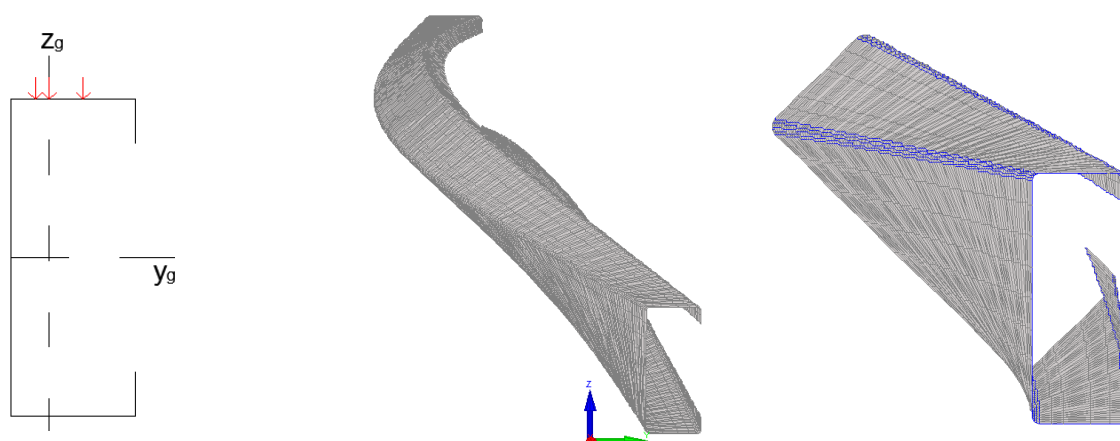


Figura 4.16 - Comportamento de estabilidade do elemento correspondente ao 1º modo de encurvadura (vista frontal) – Modelo 1

No modelo 2 a deformação do perfil evidencia que o primeiro modo de encurvadura corresponde à encurvadura local. O facto de ser um perfil com um vão relativamente grande (6 metros) seria expectável que o comportamento de instabilidade do mesmo fosse de origem global. No entanto a elevada esbelteza da secção transversal deste tipo de elementos, potencia a existência de modos de encurvadura local. Estes fenómenos traduzem-se em deformações das paredes da barra, enquanto o eixo longitudinal permanece indeformado. Na Figura 4.17 é possível distinguir dois modos de encurvadura local: i) a encurvadura local de placa, associada apenas aos deslocamentos de flexão das paredes do perfil, sem que os bordos longitudinais sofram deslocamentos; ii) e a encurvadura distorcional associada aos deslocamentos da membrana, isto é, provoca deformações nos bordos longitudinais (Camotim&Borges, 2010).

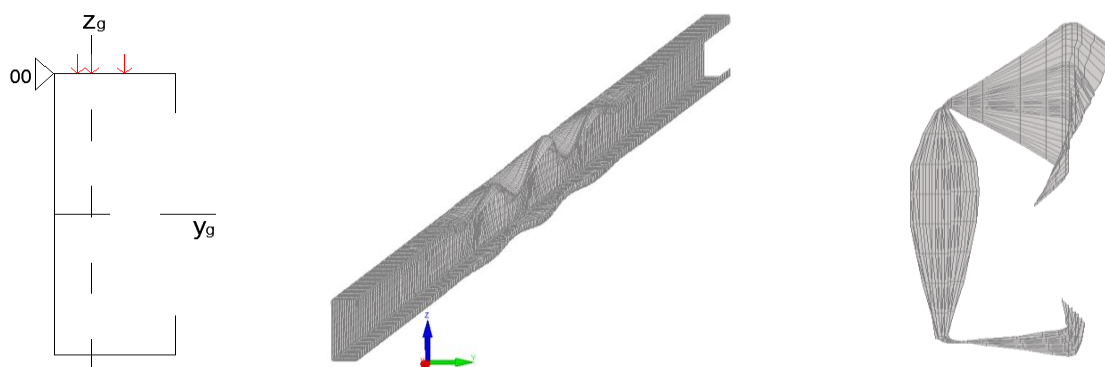


Figura 4.17 - Comportamento de estabilidade do elemento correspondente ao 1º modo de encurvadura (vista frontal) – Modelo 2

No modelo 3 a deformação do perfil torna claro que o primeiro modo de encurvadura corresponde à encurvadura global. Ocorre deformação do eixo da barra (como é perceptível na Figura 4.18), o que faz com que a secção transversal sofra deslocamentos de corpo rígido no seu plano.

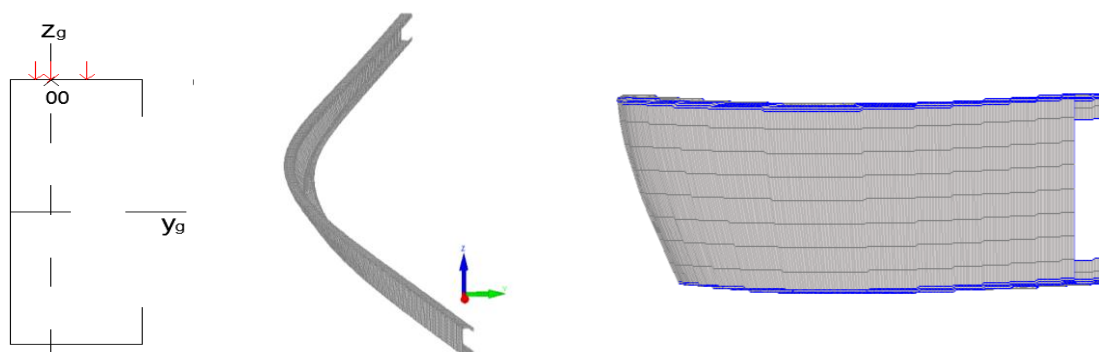


Figura 4.18 - Comportamento de estabilidade do elemento correspondente ao 1º modo de encurvadura (vista frontal) – Modelo 3

No modelo 4 a deformação apresentada pelo perfil para primeiro modo de encurvadura corresponde à encurvadura local. É possível distinguir, na Figura 4.19, fenómenos de instabilidade relacionados com a encurvadura local de placa, associada apenas aos deslocamentos de flexão das paredes do perfil, sem que os bordos longitudinais sofram deslocamentos e a fenómenos de encurvadura distorcional associados às deformações nos bordos longitudinais (reforços).

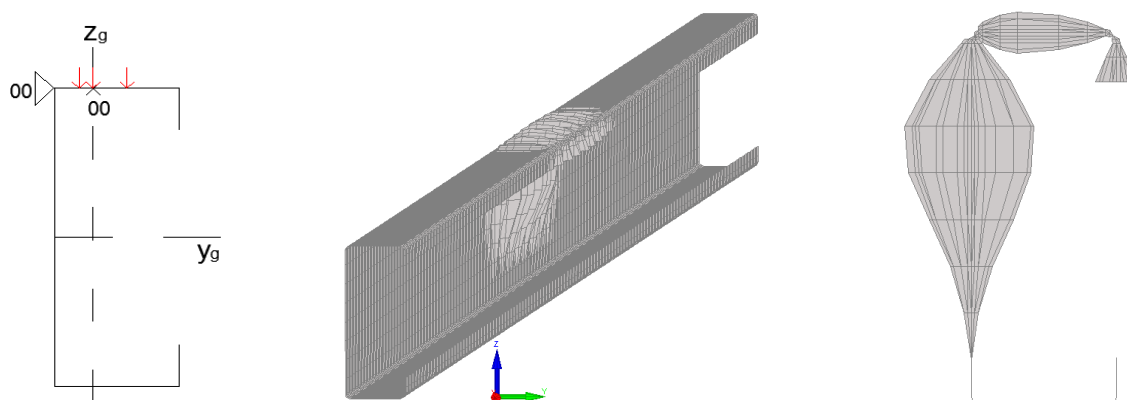


Figura 4.19 - Comportamento de estabilidade do elemento correspondente ao 1º modo de encurvadura (vista frontal) – Modelo 4

4.3.3. Resistência à encurvadura do elemento isolado

4.3.3.1. Carregamentos ascendentes

4.3.3.1.1. Temperatura ambiente

Os modelos adotados foram sujeitos a imperfeições iniciais específicas, de acordo com as imperfeições obtidas no modelo sem imperfeições iniciais (RUBY) e com as recomendações fornecidas pelo anexo C da parte 1-5 do Eurocódigo 3 - Tabela C.2 e Figura C.1. Para uma combinação apropriada destas formas, deve ser escolhida uma imperfeição principal (dominante) e a imperfeição que acompanha a anterior deve sofrer uma redução para 70% do seu valor (CEN, 2006b).

A influência das tensões residuais foram desprezadas uma vez que as mesmas tem pouca influência.

Para determinar a resistência à encurvadura através dos modelos numéricos é necessário retirar o valor corresponde à carga de colapso (P_{colapso}) do programa de elementos finitos

SAFIR. Por se tratar de uma viga simplesmente apoiada (com um vão, L , de 6 metros) o momento resistente da secção obtém-se, através da carga última obtida numericamente, da seguinte forma:

$$M_{colapso} = \frac{P_{colapso}L^2}{8} \quad (65)$$

A tensão última obtida numericamente obtém-se através do quociente entre o momento resistente obtido numericamente, pelo módulo de flexão efetivo, segundo y-y, do perfil (W_y).

$$\sigma_{colapso} = \left(\frac{M_{colapso}}{W_y} \right) \quad (66)$$

A Tabela 4.5 apresenta os valores obtidos numericamente para a carga de colapso, momento de colapso e tensão de colapso dos diferentes modelos considerados.

A capacidade resistente do perfil varia consoante as restrições aplicadas. O modelo 1 (não possui qualquer restrição adicional) é o que apresenta menor capacidade resistente. A restrição à rotação (aplicada no modelo 3), é mais eficaz no que diz respeito à capacidade resistente do que uma restrição lateral (modelo 2). O modelo 4 é o que apresenta maior capacidade resistente.

Tabela 4.5 - Tensão última obtida para os diferentes modelos - carregamentos ascendentes

Modelo	SAFIR		
	$P_{colapso}$	$M_{colapso}$	$\sigma_{colapso}$
	(N/m)	(kN.m)	Mpa
1	290.4	1.31	17.9
2	303.7	1.37	34.2
3	749.5	3.37	228.0
4	822.7	3.70	284.5

Na Figura 4.20 estão ilustradas as deformações correspondentes à carga de colapso apresentadas para os diferentes modelos considerados.

Uma situação de carregamento ascendente, em qualquer um dos modelos, implica que o banzo superior esteja sujeito a tensões de tração e o banzo inferior a tensões de compressão. Em elementos de aço no geral e nos enformados a frio em particular, devido à sua esbelteza, os problemas surgem nas zonas comprimidas (neste caso no banzo inferior). No modelo 1 (Figura 4.20 (a)) a secção não possui qualquer tipo de restrição, pelo que à medida que o carregamento aumenta é afetada por deslocamentos verticais e horizontais,

sofrendo rotação em torno do seu eixo longitudinal. Devido às condições de apoio (trata-se de um elemento simplesmente apoiado), a secção sofre rotações por torção (encurvadura lateral) e deslocamentos de corpo rígido no seu plano. No modelo 2 (Figura 4.20 (b)) a secção está restringida lateralmente no banzo superior, pelo que sofre rotação em torno do seu eixo longitudinal (traduz-se em fenómenos de encurvadura lateral e encurvadura global) e deslocamentos verticais para fora do seu plano inicial. No modelo 3 devido ao bloqueio à rotação (na direcção longitudinal do perfil x-x) a secção está impedida de rodar, pelo que sofre deslocamentos verticais para fora do seu plano e fenómenos de empenamento nessa direcção como é perceptível na (Figura 4.20 (c)). O comportamento do modelo 4 é semelhante ao do modelo 3, apesar de o modelo 4 possuir uma restrição ao deslocamento lateral aplicada no banzo superior (bloqueia o deslocamento nessa direcção) a restrição à rotação em torno do eixo longitudinal do perfil é mais condicionante. É importante referir que nos casos abordados, em situações de carregamentos ascendentes devido à carga ser aplicada no C.G (centro de gravidade) da secção transversal do perfil, os deslocamentos verticais que a secção sofre são no sentido da aplicação da carga.

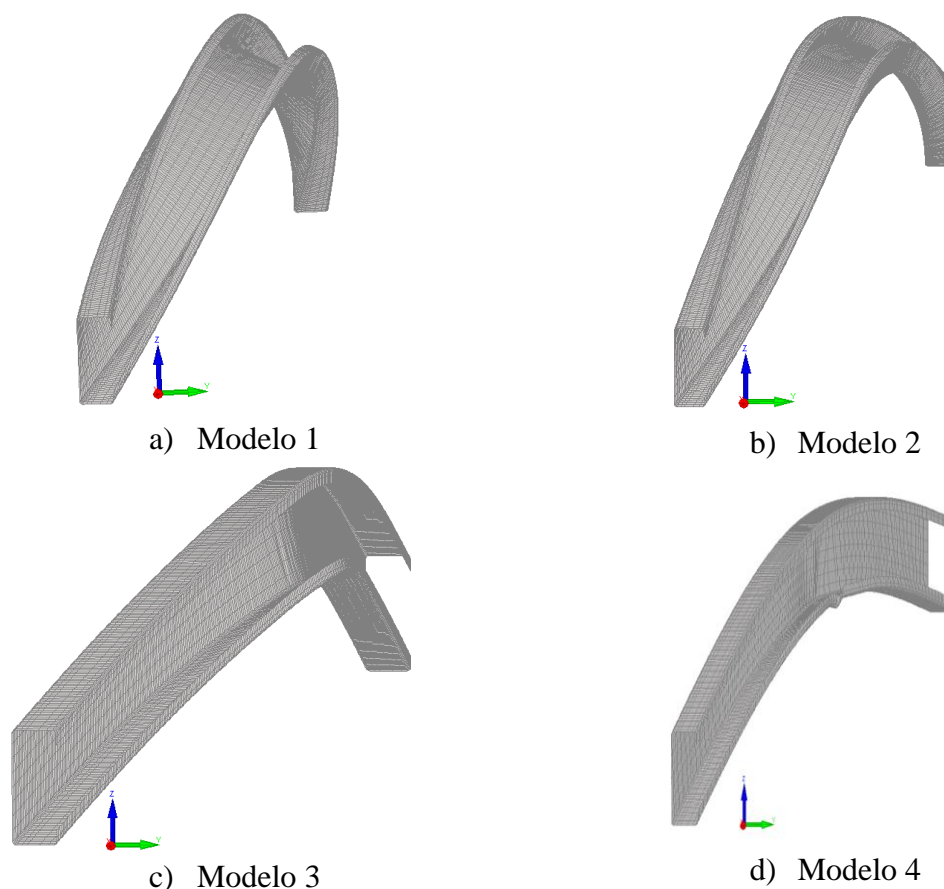


Figura 4.20 - Deformação dos perfis, para os diferentes modelos, correspondente à carga última

4.3.3.1.2. Situação de incêndio

Segundo a parte 1-2 do EC3 apenas há que considerar o efeito das deformações resultantes dos gradientes térmicos no interior da secção transversal, podendo o efeito da dilatação térmica ser desprezado quando se faz uma análise por elementos. No que diz respeito às condições fronteiras podem ser consideradas constantes durante o incêndio. Num elemento com distribuição uniforme de temperatura, a temperatura crítica representa a temperatura do aço no instante t em que a capacidade de carga do elemento ($R_{fi,d,t}$) iguala o efeito das cargas aplicadas ($E_{fi,d}$), ou seja, o instante em que ocorre colapso e se verifica a condição (Vila Real, 2003):

$$E_{fi,d} = R_{fi,d,t} \quad (67)$$

A resistência à encurvadura, atingida através dos modelos numéricos, das madres enformadas a frio é obtida da mesma maneira que se procedeu à temperatura ambiente. As alterações impostas pelo facto de a temperatura ser distinta (passar de 20°C para 500°C) são efetuadas nos ficheiros *inputs* (*fload* e *t* apresentados no Anexo A.1), que estão na génese dos modelos.

$$\sigma_{colapso} = \frac{M_{colapso}}{W_y} \quad (68)$$

A Tabela 4.6 apresenta os valores obtidos numericamente para a carga, momento e tensão de colapso dos diferentes modelos considerados.

Tabela 4.6 - Tensão de colapso obtida para os diferentes modelos em situação de incêndio (carregamentos ascendentes)

Modelo	SAFIR		
	$P_{colapso}$	$M_{colapso}$	$\sigma_{colapso}$
	(N/m)	(kN.m)	Mpa
1	161.7	0.73	9.9
2	164.2	0.74	17.5
3	372.5	1.68	94.8
4	426.0	1.92	167.3

O comportamento a elevadas temperaturas dos diferentes modelos, isto é a capacidade resistente e o tipo de deformação apresentada, é semelhante ao que se passa à temperatura ambiente. No entanto, como é expectável, a capacidade resistente dos modelos é inferior a 500°C quando comparada com o que se passa a 20°C (reduz-se, sensivelmente, a metade).

Não são apresentadas as deformações correspondentes à carga última dos diferentes modelos, uma vez que são idênticas às obtidas à temperatura ambiente.

4.3.3.2. Carregamentos descendentes

4.3.3.2.1. Temperatura ambiente

Os modelos adotados foram sujeitos a imperfeições iniciais específicas, de acordo com as imperfeições obtidas no modelo sem imperfeições iniciais (RUBY) e com as recomendações fornecidas pelo anexo C da parte 1-5 do Eurocódigo 3 - Tabela C.2 e Figura C.1. Para uma combinação apropriada destas formas, deve ser escolhida uma imperfeição principal (dominante) e a imperfeição que acompanha a anterior deve sofrer uma redução para 70% do seu valor (CEN, 2006b).

A resistência à encurvadura, obtida através dos modelos numéricos, das madres enformadas a frio é determinada da mesma maneira que se procedeu para carregamentos ascendentes. Os modelos numéricos são os mesmos, o carregamento difere apenas no sentido. A Tabela 4.5 apresenta os valores obtidos numericamente para a carga de colapso, momento de colapso e tensão de colapso dos diferentes modelos considerados.

Tabela 4.7 - Tensão de colapso obtida para os diferentes modelos (carregamentos descendentes)

Modelo	SAFIR		
	P_{colapso}	M_{colapso}	σ_{colapso}
	(N/m)	(kN.m)	Mpa
1	270.8	1.22	8.9
2	286.4	1.29	38.0
3	797.1	3.59	242.2
4	789.4	3.55	298.9

Na Figura 4.21 estão ilustradas as deformações correspondentes à carga de colapso apresentadas para os diferentes modelos considerados.

Uma situação de carregamento descendente, em qualquer um dos modelos, implica que o banzo superior esteja sujeito a tensões de compressão e o banzo inferior a tensões de tração.

No modelo 1 (Figura 4.21 (a)) a secção não possui qualquer tipo de restrição, pelo que à medida que o carregamento aumenta é afetada por deslocamentos verticais e horizontais, sofrendo rotação em torno do seu eixo longitudinal. Devido às condições de apoio (trata-se de um elemento simplesmente apoiado), a secção sofre rotações por torção (encurvadura lateral) e deslocamentos de corpo rígido no seu plano (encurvadura global). No modelo 2

(Figura 4.21 (b)) a secção está restringida lateralmente no banco superior, pelo que sofre rotação em torno do seu eixo longitudinal (traduz-se em fenómenos de encurvadura lateral) e deslocamentos verticais para fora do seu plano inicial. No modelo 3 devido ao bloqueio à rotação (na direção longitudinal do perfil x-x) a secção está impedida de rodar, pelo que sofre deslocamentos verticais para fora do seu plano e rotações de torção (empenamento) como é perceptível na Figura 4.21 (c). O comportamento do modelo 4 é semelhante ao do modelo 3, apesar de o modelo 4 possuir uma restrição ao deslocamento lateral aplicada no banco superior (bloqueia o deslocamento nessa direção) restrição à rotação em torno do eixo longitudinal do perfil é mais condicionante.

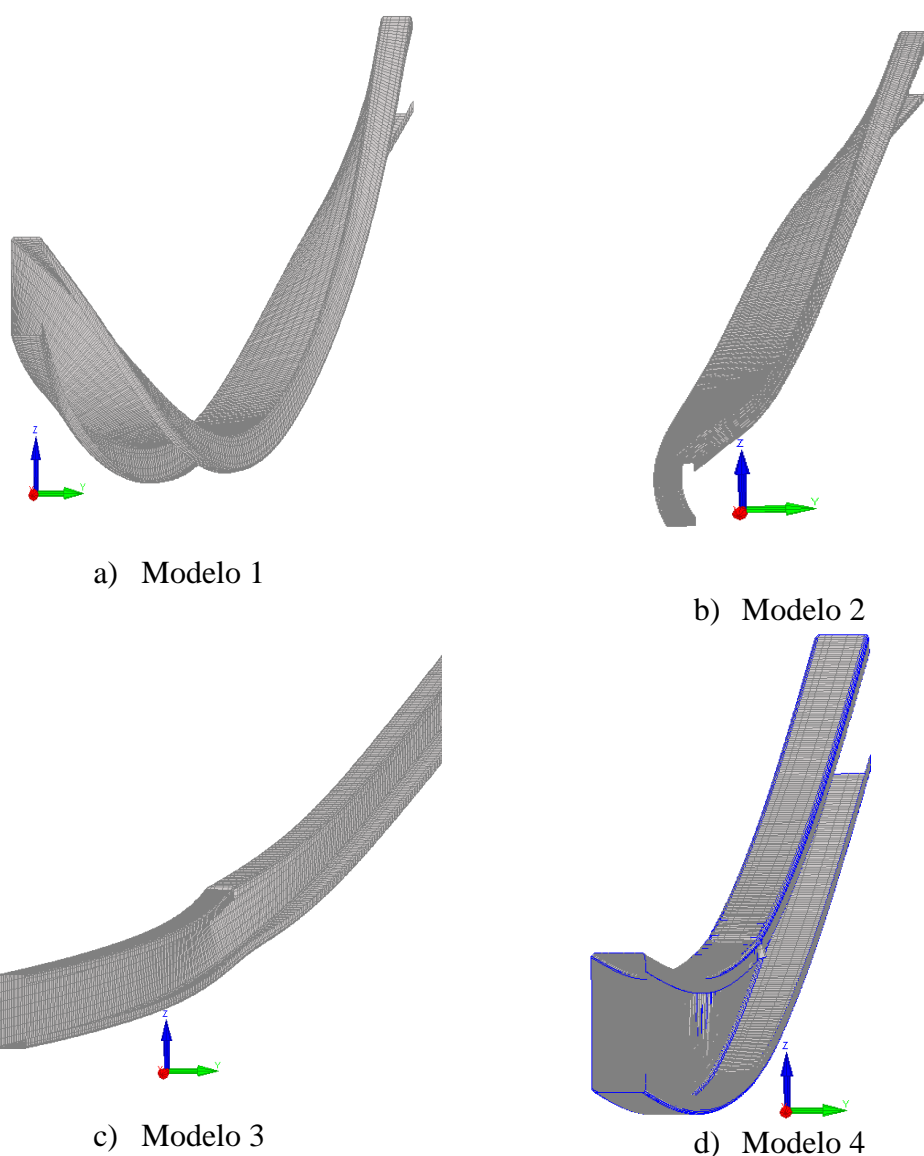


Figura 4.21 - Deformação dos perfis, para os diferentes modelos, correspondente à carga última para carregamentos descendentes

4.3.3.2.2. Situação de incêndio

A determinação da resistência à encurvadura, através dos modelos numéricos, das madres enformadas a frio em situação de incêndio já foi explicada no ponto que diz respeito uma situação de carregamentos ascendentes (cf. 4.3.3.1.2). Para carregamentos descendentes o procedimento é o mesmo, a única alteração a fazer é no sentido das cargas.

A Tabela 4.8 apresenta os valores obtidos numericamente para a carga, momento e tensão de colapso dos diferentes modelos considerados. A capacidade resistente do perfil varia consoante as restrições aplicadas. Para carregamentos ascendentes, para carregamentos descendentes o comportamento a elevadas temperaturas dos diferentes modelos, isto é a capacidade resistente e o tipo de deformação apresentada, é semelhante ao que se passa à temperatura ambiente. Não são apresentadas as deformações correspondentes à carga última dos diferentes modelos, uma vez que são idênticas às obtidas à temperatura ambiente.

Tabela 4.8 - Tensão de colapso obtida para os diferentes modelos em situação de incêndio (carregamentos descendentes)

Modelo	SAFIR		
	P_{colapso}	M_{colapso}	σ_{colapso}
	(N/m)	(kN.m)	Mpa
1	151.8	0.68	5.4
2	163.2	0.73	20.1
3	392.4	1.77	87.3
4	464.4	2.09	149.8

4.3.4. Comparação dos resultados obtidos no SAFIR com a formulação preconizada pelo Eurocódigo 3

Na Tabela 4.9 estão sumariados os resultados obtidos - pela formulação sugerida pelo Eurocódigo 3 e os resultados alcançados através do programa de elementos finitos, SAFIR - para a tensão de colapso de madres enformadas a frio sem chapas de revestimento à temperatura ambiente, numa situação de carregamento ascendente.

Como já foi referido anteriormente, a tensão de colapso difere de modelo para modelo e aumenta à medida que se acrescentam restrições, sendo mais eficaz uma restrição à rotação que uma restrição lateral.

O quociente entre os valores conseguidos, para a tensão de colapso, através da metodologia preconizada no EC3 e os alcançados através da modelação numérica tende para 1 à medida que se impõem mais restrições, isto é, quanto mais restringido estiver o modelo maior é a relação entre os resultados obtidos através das metodologias abordadas.

Tabela 4.9 - Comparação de resultados à temperatura de 20°C em carregamentos ascendentes.

Modelo	EC3			SAFIR		σ_{colapso}		EC3/SAFIR
	λ_{LT}	χ_{LT}	$M_{b,Rd}$	P_{colapso}	M_{colapso}	Mpa		
			kN.m	N/m	kN.m	SAFIR	EC3	
1	2.49	0.14	0.46	290.4	1.31	16.1	45.1	2.52
2	1.78	0.26	0.84	303.7	1.37	30.8	82.1	2.40
3	0.85	0.70	2.29	749.5	34.2	205.4	222.4	0.98
4	0.69	0.79	2.60	827.7	228.0	256.3	252.7	0.89

O gráfico da Figura 4.22 ilustra a relação entre os valores obtidos, para a tensão de colapso, pela modelação numérica e pela formulação do Eurocódigo 3. Os resultados conseguidos pelo EC3 revelam-se sempre superiores (exceção feita no modelo 4 que os valores são idênticos), aos conseguidos através da modelação numérica o que nos remete para a ideia de insegurança, sobretudo quando os elementos viga não possuem restrições efetivas. Em 2013, investigadores da Universidade de Coimbra chegaram a conclusões semelhantes, concluíram que a análise de elementos finitos preconizada pelo EN1993-1.3, para o dimensionamento de vigas enformadas a frio poderia ser insegura para vigas com vãos superiores a 4,5 m (Laím et al., 2013).

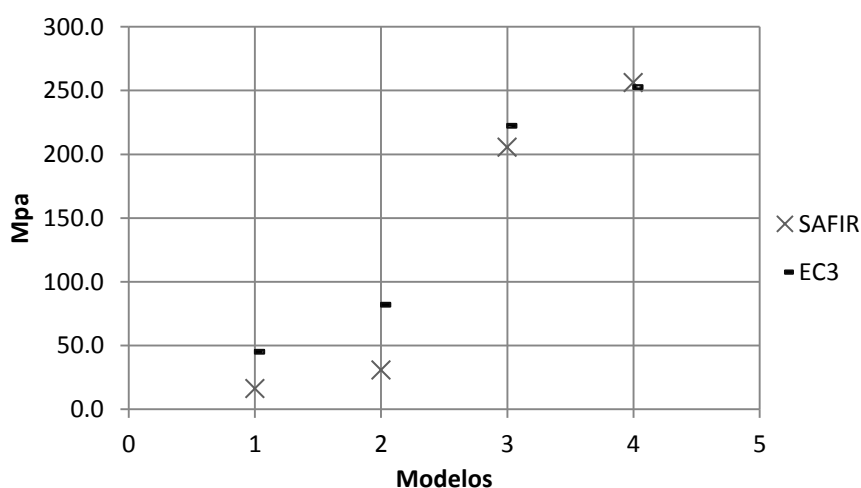


Figura 4.22 - Tensão de colapso obtida, pelas duas abordagens consideradas, para os diferentes modelos à temperatura ambiente em carregamentos ascendentes

Em situação de incêndio, isto é, quando as madres estão sujeitas a temperaturas elevadas (500°C), os resultados obtidos, para a tensão de colapso, são inferiores quando comparados

com o que se passa à temperatura ambiente. Na Tabela 4.10, para além do que já foi mencionado, atesta-se que a 500°C a relação entre os resultados obtidos é algo irregular. Nos modelos sem restrições ou com restrições pouco efetivas (Modelo 1 e Modelo 2) os resultados alcançados para a tensão de colapso pelo EC3 são, aproximadamente, o dobro dos obtidos pela modelação numérica. Se nestes modelos a formulação do Eurocódigo parece ser insegura, nos modelos 3 e 4 (com restrições significativas) a formulação preconizada pelas disposições Europeias aproxima-se dos valores atingidos na modelação numérica. Sendo que no modelo 4 o EC3 apresentar valores algo conservativos. Esta irregularidade de resultados pode ser justificável com o facto de a parte 1-2 do Eurocódigo 3 não conter especificações para o dimensionamento, a temperaturas elevadas, de perfis enformados em frio com secção transversal em “C”.

Tabela 4.10 - Comparação de resultados à temperatura de 500°C em carregamentos ascendentes.

Modelo	EC3			SAFIR		$\sigma_{colapso}$		EC3/SAFIR
	$\lambda_{LT,0}$	$\chi_{LT,fi}$	$M_{b,Rd}$	$P_{colapso}$	$M_{colapso}$	Mpa		
			kN.m	N/m	kN.m	SAFIR	EC3	
1	2.37	0.14	0.19	161.7	0.73	8.9	18.3	1.85
2	1.69	0.24	0.33	164.2	0.74	15.8	31.7	1.81
3	0.81	0.58	0.78	372.5	1.68	85.4	75.7	0.80
4	0.66	0.90	0.89	426.0	1.92	150.7	86.3	0.52

O gráfico da Figura 4.23 apresenta os valores obtidos para a tensão de colapso, através das duas metodologias de cálculo consideradas.

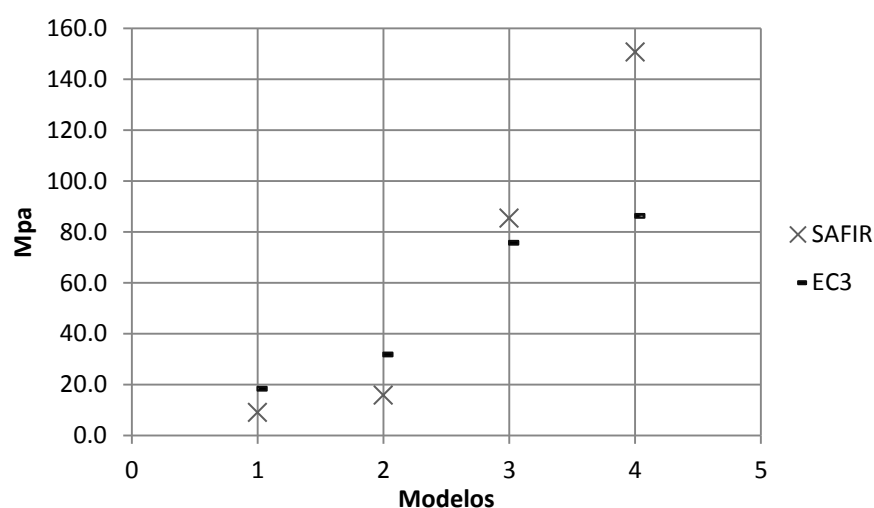


Figura 4.23 - Tensão de colapso obtida, pelas duas abordagens consideradas, para os diferentes modelos a 500°C em carregamentos ascendentes

É possível constatar que, quer a temperatura elevada (500°C) quer à temperatura ambiente (20°C), em carregamentos ascendentes uma restrição lateral aplicada no banzo superior

(modelo 2) não se revela efetiva. Isto deve-se ao facto de os problemas de encurvadura em secções deste género surgirem nas zonas comprimidas. Como é o banzo inferior que está sujeito a tensões de compressão, o que faz com que este sofra fenómenos de rotação por torção (encurvadura lateral) e deslocamentos (verticais e/ou horizontais para fora do seu plano), tal como já foi referido, a aplicação de uma restrição no banzo tracionado (superior) em pouco contribui para os fenómenos que afetam a zona comprimida.

Na Tabela 4.11 estão sintetizados os resultados conseguidos - pela formulação do Eurocódigo 3 e os resultados obtidos através do programa de elementos finitos, SAFIR - para a tensão de colapso das madres enformadas a frio sem chapas de revestimento à temperatura ambiente numa situação de carregamento descendente. A tensão de colapso difere de modelo para modelo e aumenta à medida que se acrescentam restrições, sendo mais eficaz uma restrição à rotação que uma restrição lateral. Tal como sucede para carregamentos ascendentes.

O quociente entre os valores conseguidos, para a tensão de colapso, através da metodologia de cálculo preconizada no Eurocódigo 3 e os alcançados através da modelação numérica tende para 1 à medida que se impõem mais restrições, isto é, quanto mais restringido estiver o modelo maior é a relação entre os resultados obtidos através das metodologias adotadas.

Tabela 4.11 - Comparação de resultados à temperatura de 20°C em carregamentos descendentes.

Modelo	EC3		SAFIR			σ_{colapso}		EC3/SAFIR
	λ_{LT}	χ_{LT}	$M_{b,Rd}$	P_{colapso}	M_{colapso}	Mpa		
			kN.m	N/m	kN.m	SAFIR	EC3	
	1	3.39	0.08	0.26	258.8	1.16	8.9	
2	1.62	0.30	1.0	286.4	1.29	38.0	96.9	
3	0.85	0.69	2.3	797.1	3.59	242.2	221.9	
4	0.54	0.866	2.9	789.4	3.55	298.9	276.7	

No gráfico da Figura 4.24 é visível a relação entre os valores obtidos, para a tensão de colapso, através das metodologias consideradas. Os resultados obtidos com base no disposto no Eurocódigo 3 revelam-se sempre superiores aos conseguidos através da modelação numérica. Nos modelos mais restringidos os resultados são bastante próximos.

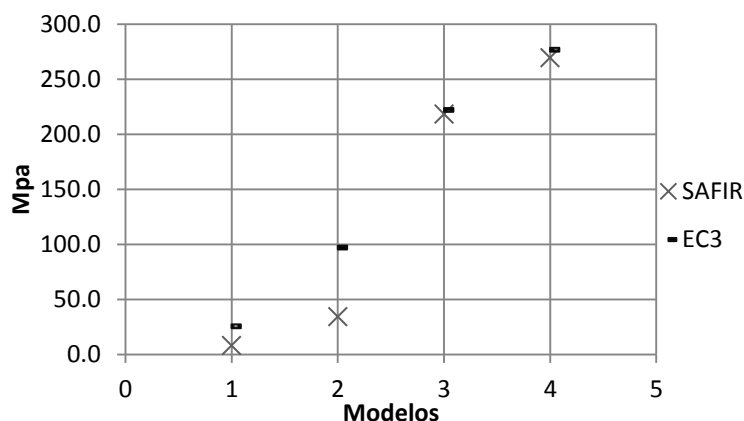


Figura 4.24 - Tensão de colapso obtida, pelas duas abordagens consideradas, para os diferentes modelos à temperatura ambiente em carregamentos descendentes

Em situação de incêndio os resultados alcançados, para a tensão de colapso, são inferiores quando comparados com o que se passa à temperatura ambiente.

Na Tabela 4.12, para além do que já foi mencionado, verifica-se que a 500°C não se pode generalizar quanto à evolução da relação entre os resultados obtidos. A análise dos resultados é semelhante à realizada para carregamentos ascendentes

Tabela 4.12 - Comparação de resultados à temperatura de 500°C em carregamentos descendentes.

Modelo	EC3			SAFIR		σ_{colapso}		
	$\lambda_{LT,0}$	$\chi_{LT,\text{fi}}$	$M_{b,Rd}$	P_{colapso}	M_{colapso}	Mpa		EC3/SAFIR
			kN.m	N/m	kN.m	SAFIR	EC3	
1	3.22	0.08	0.11	151.8	0.68	5.4	10.6	1.97
2	1.54	0.28	0.38	163.2	0.73	20.1	36.7	1.82
3	0.81	0.51	0.78	392.4	0.77	87.3	75.6	0.87
4	0.51	0.74	1.00	464.4	2.09	149.8	96.0	0.64

No gráfico da Figura 4.25 é perceptível a relação entre os valores obtidos, para a tensão de colapso, pela modelação numérica e pela formulação do Eurocódigo 3.

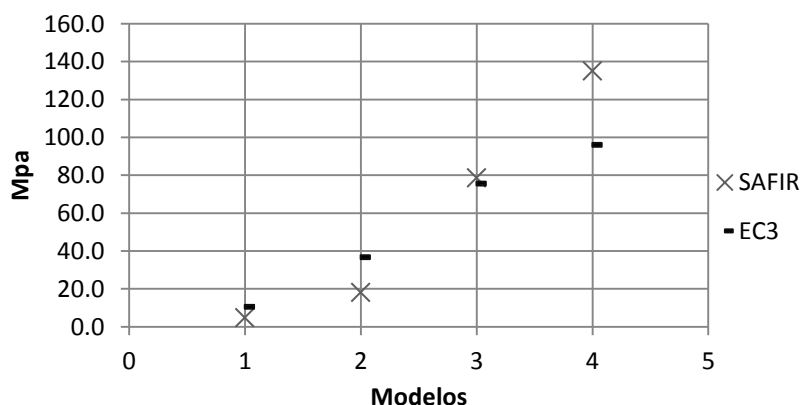


Figura 4.25 - Tensão de colapso obtida, pelas duas abordagens consideradas, para os diferentes modelos a 500°C em carregamentos descendentes

4.4. Madres enformadas a frio com chapas de revestimento

4.4.1. Modelos numéricos

A parte 1-3 do Eurocódigo 3 (CEN, 2006a) propõe, para considerar o efeito das chapas de revestimento do dimensionamento dos perfis, o modelo apresentado na Figura 4.26 (a). Este apresenta duas restrições distintas: uma restrição lateral (tirante), aplicanda no banzo superior, com rigidez axial infinita; e uma restrição rotacional com uma rigidez C_D (parâmetro determinado 3.2.3). De maneira a realizar uma análise numérica através do programa de elementos finitos (SAFIR) é necessário determinar um modelo equivalente ao proposto pelo EC3, Figura 4.26 (c). O elemento estrutural que permite a realização da simulação numérica com um comportamento mais semelhante, no que toca à rigidez e deformação, ao apoio proposto pelo EC3 um elemento viga com um slide aplicado numa extremidade.

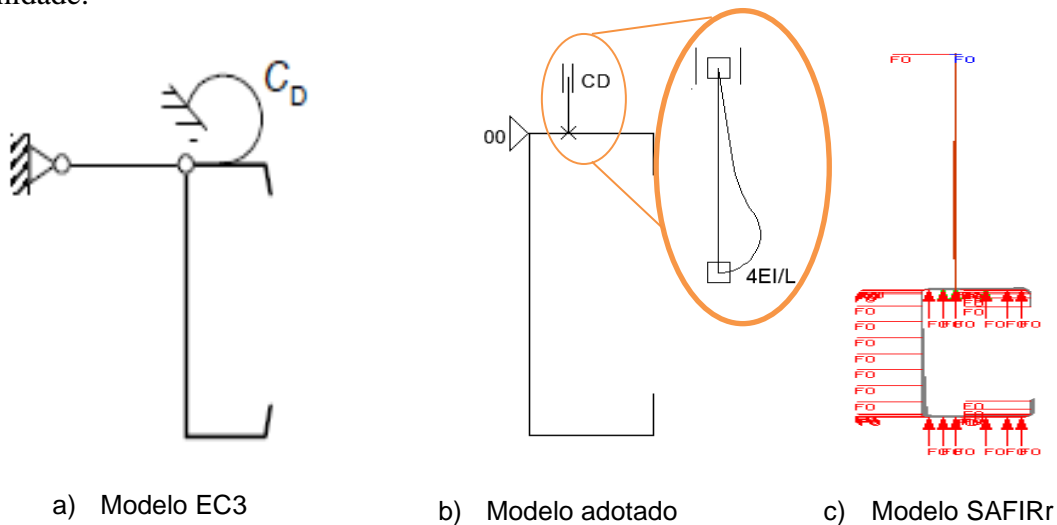


Figura 4.26 - Modelo adotado para simular o efeito das chapas de revestimento nos perfis

A secção transversal do elemento viga é definida em função da rigidez axial do mesmo e do parâmetro C_D .

Igualando a rigidez do elemento viga a C_D obtêm-se as dimensões da secção transversal:

$$C_D = \frac{4EI}{L} \quad (69)$$

Sendo,

- E – o módulo de elasticidade longitudinal da chapa perfilada (210 GPa) e L o comprimento do elemento viga.

Foram testados diversos comprimentos nomeadamente 1m, 0.2m e 0.02m, foi para 0.2m que se obtiveram os resultados mais satisfatórios. Nos elementos viga optou-se por dividir o elemento em 4 subelementos iguais de 0.05m de comprimento cada de modo a obter uma deformação mais refinada.

A chapa perfilada adotada na modelação é uma chapa comercial da empresa O Feliz (OFELIZ, 2014) do tipo “P1-272-30” com 0.75 mm de espessura. Como o parâmetro C_D depende do sentido do carregamento obtêm-se secções transversais distintas, uma para carregamentos ascendentes e outra para carregamentos descendentes, para o elemento viga. As dimensões da secção transversal adotadas para o elemento viga encontram-se na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Secção transversal adotada, em função do sentido do carregamento, para o elemento viga

Carregamento	C_D (N.mm/mm)	b (mm)	h (mm)
Ascendente	327.0	1.0	1.0
Descendente	1124.8	2.0	1.2

Na definição dos modelos as condições de apoio foram impostas, sob a forma de restrições, nas extremidades de forma a reproduzir um apoio duplo e outro simples (elementos simplesmente apoiado). A malha do modelo numérico foi refinada de forma a serem obtidos elementos pequenos nas posições onde ocorrem momentos máximos e de elevada deformação, de modo a que o programa SAFIR os possa captar com mais rigor e precisão.

A aplicação das cargas foi um aspeto fundamental a ter em conta de forma a produzir no elemento os efeitos desejados e a não provocar deslocamentos e rotações indesejadas, ou o impedimento das mesmas. As restantes condicionantes, características a este tipo de modelação, estão apresentadas no ponto 4.2.2 do presente trabalho.

4.4.2. Resistência à encurvadura

4.4.2.1. Carregamentos ascendentes

Os modelos adotados foram sujeitos a imperfeições iniciais específicas, de acordo com as imperfeições obtidas no modelo sem imperfeições iniciais (RUBY) e com as recomendações fornecidas pelo anexo C da parte 1-5 do Eurocódigo 3 - Tabela C.2 e Figura C.1. Para uma

combinação apropriada destas formas, deve ser escolhida uma imperfeição principal (dominante) e a imperfeição que acompanha a anterior deve sofrer uma redução para 70% do seu valor (CEN, 2006b). Em carregamentos ascendentes a verificação da resistência à encurvadura faz-se no banzo livre por este se encontrar sujeito a tensões de compressão.

4.4.2.2. Temperatura ambiente

Para determinar a resistência à encurvadura à temperatura ambiente, em carregamentos ascendentes, é necessário retirar o valor corresponde à carga colapso ($P_{colapso}$) do programa de elementos finitos SAFIR.

Com a carga de colapso obtida através do SAFIR é possível com base na metodologia de cálculo apresentada na parte 1-3 do EC3 determinar a tensão de colapso do conjunto estrutural através de:

$$\sigma_{colapso} = \frac{1}{\chi_{LT}} \left(\frac{M_{colapso}}{W_{eff,y}} \right) + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} \quad (70)$$

Por se tratar de uma viga simplesmente apoiada, sujeita a flexão simples (com um vão, L , de 6 metros), o momento de colapso da secção obtém-se através da carga de colapso obtida numericamente:

$$M_{colapso} = \frac{P_{colapso} L^2}{8} \quad (kN.m) \quad (71)$$

Para determinar o momento fletor lateral, $M_{fz,Ed}$, usa-se a seguinte expressão:

$$M_{fz,Ed} = \kappa_R M_{0,fz,Ed} \quad (72)$$

Em que,

- κ_R é definido na Tabela 3.1 do ponto 3.2.1 do presente trabalho;
- O momento fletor lateral inicial, $M_{0,fz,Ed}$, é determinado a partir de:

$$M_{0,fz,Ed} = \frac{Q_{colapso} L^2}{8} \quad (kN.m) \quad (73)$$

Sendo,

$$Q_{colapso} = k_h P_{colapso} \quad (74)$$

Em que,

- k_h é o fator de carga lateral equivalente e encontra-se definido na Figura 3.6 (3.2.1);
- W_{fz} é o modulo de flexão lateral, de uma secção S_{fz} , em torno de z-z (cf. Figura 3.4 - 3.2.1);
- $W_{eff,y}$ é o módulo de flexão efetivo da secção em torno de y-y;
- χ_{LT} é o coeficiente de redução para encurvadura lateral determinado no ponto 3.2.4 do presente trabalho.

A Tabela 4.14 apresenta, sumariamente, os valores necessário à determinação da tensão de colapso à temperatura ambiente, numa situação de carregamento ascendente, para um modelo numérico que considera a influência das chapas de revestimento no dimensionamento dos perfis.

Tabela 4.14 - Tensão de colapso obtida, para carregamentos ascendentes, para perfis com chapas de revestimento a 20°C

$P_{colapso}$ (N/m)	303.16	$q_{h,Ed}$ (kN)	0.17
$P_{colapso}$ (kN/m)	0.303	$M_{0,fz,Ed}$ (kN.m)	0.76
$M_{colapso}$ (kN.m)	1.36	$M_{fz,Ed}$ (kN.m)	0.003
k_h	0.56		
$\sigma_{colapso}$ (Mpa)			243.3

Na Figura 4.27 é ilustrado o comportamento estrutural à temperatura ambiente do conjunto, madre mais chapa de revestimento, numa situação de carregamento ascendente. A secção transversal da madre encontra-se restringida lateralmente no banzo superior (ao longo de todo o vão) com rigidez axial infinita. Em ambas as extremidades do vão e a cada metro da extensão longitudinal do perfil é colocado um elemento viga, com rigidez C_D , de modo a simular o efeito das chapas de revestimento no comportamento estrutural da madre.

Como é perceptível através da deformação do perfil a secção sofre rotação por torção em torno do seu eixo longitudinal (traduz-se em fenómenos de encurvadura lateral) e deslocamentos verticais para fora do seu plano inicial. O facto de a secção sofrer rotações em torno do seu eixo longitudinal e a própria chapa perfilada sofrer rotações por torção significa que a chapa perfilada não confere rigidez rotacional suficiente para impedir que essas rotações aconteçam. Seria interessante, num trabalho futuro, perceber o que acontece com uma chapa perfilada com maior rigidez rotacional - com uma chapa comercial, da

empresa o “Feliz”, do tipo “P4-76-20” com 0.75 mm de espessura ou com uma “P3-205-60” com 1.2 mm de espessura - por exemplo.

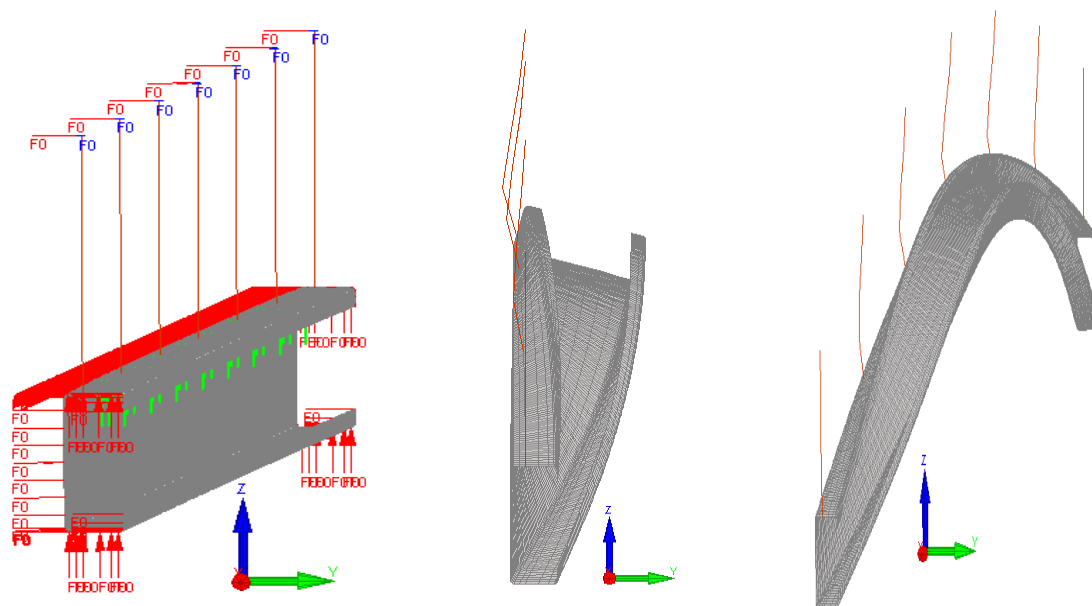


Figura 4.27 - Comportamento de um perfil restringido por uma chapa perfilada em carregamentos ascendentes

4.4.2.2.1. Situação de incêndio

Para determinar a resistência à encurvadura à temperatura de 500°C, em carregamentos ascendentes, valor corresponde à carga colapso (P_{colapso}) é retirado do programa de elementos finitos SAFIR. O procedimento é semelhante ao apresentado no ponto 4.3.3.1.2. Deve-se procurar o instante t em que ocorre o colapso do elemento estrutural, isto é o instante em que a capacidade de carga do elemento ($R_{fi,d,t}$) iguala o efeito das cargas aplicadas ($E_{fi,d}$).

Determinada a carga de colapso, o cálculo da tensão de colapso procede-se da mesma maneira que à temperatura ambiente.

As alterações residem no valor do coeficiente de redução para encurvadura lateral, este deve ser determinado para situação de incêndio $\chi_{LT,fi}$ (cf. 3.3.4), e nos ficheiros *inputs* (*fload* e *t*), que estão na génese dos modelos (cf. Anexo A.1).

A Tabela 4.15 apresenta os valores necessário à determinação da tensão de colapso à temperatura de 500°C (temperatura característica em situação de incêndio), numa situação

de carregamento ascendentes, para um modelo numérico que considera a influência das chapas de revestimento no dimensionamento dos perfis.

Tabela 4.15 - Tensão de colapso obtida, para carregamentos ascendentes, para perfis com chapas de revestimento a 500°C

P_{colapso} (N/m)	124.1	q_{h,Ed} (kN)	0.07
P_{colapso} (kN/m)	0.124	M_{0,fz,Ed} (kN.m)	0.31
M_{colapso} (kN.m)	0.56	M_{fz,Ed} (kN.m)	0.0075
k_h	0.56		
σ_{colapso} (Mpa)			126.2

4.4.2.3. Carregamentos descendentes

Numa situação de carregamento descendente o banzo superior (comprimido) está restringindo pelas chapas perfiladas (devido à conexão), pelo que não sofre de fenómenos de encurvadura. O Eurocódigo 3 não especifica nenhuma verificação adicional para estas situações, pelo que na avaliação da resistência da conjunto madre mais chapa se considera, apenas, a resistência da secção transversal.

Não é necessário verificar a resistência à encurvadura do banzo livre pois este não está comprimido (cf. Cláusula (1) do ponto 10.1.4.2 da parte 1-3 do EC3).

4.4.2.3.1. Temperatura ambiente

Deste modo o cálculo da tensão de colapso à temperatura ambiente, em carregamentos descendentes, através da análise numérica é realizado através de:

$$\sigma_{colapso} = \left(\frac{M_{colapso}}{W_{eff,y}} \right) \quad (75)$$

Na Tabela 4.16 apresenta-se os valores necessário à determinação da tensão de colapso à temperatura ambiente, numa situação de carregamento descendente, para um modelo numérico que considera a influência das chapas de revestimento no dimensionamento dos perfis.

Tabela 4.16 - Tensão de colapso obtida, para carregamentos descendentes, para perfis com chapas de revestimento a 20°C

P_{colapso} (N/m)	182.3
M_{colapso} (kN.m)	0.8
σ_{colapso} (Mpa)	79.8

Na Figura 4.28 é ilustrado o comportamento estrutural à temperatura ambiente do conjunto, madre mais chapa de revestimento, numa situação de carregamento descendente. A secção transversal da madre encontra-se restringida lateralmente no banzo superior (ao longo de todo o vão) com rigidez axial infinita. Em ambas as extremidades do vão e a cada metro da extensão longitudinal do perfil é colocado um elemento viga, com rigidez C_D , de modo a simular o efeito das chapas de revestimento no comportamento estrutural da madre.

Como é perceptível através da deformação do perfil a secção sofre rotação por torção em torno do seu eixo longitudinal (traduz-se em fenómenos de encurvadura lateral) e deslocamentos verticais para fora do seu plano inicial. A rotação da secção ocorre no sentido oposto ao que ocorria numa situação de carregamento ascendente. O facto de a secção sofrer rotações em torno do seu eixo longitudinal e a própria chapa perfilada sofrer rotações por torção significa que a chapa perfilada não possui rigidez rotacional à flexão suficiente para impedir que essas rotações aconteçam. Como é perceptível na Figura 4.28 os principais problemas que afetam o conjunto estrutural ocorrem na zona comprimida, neste caso no banzo superior.

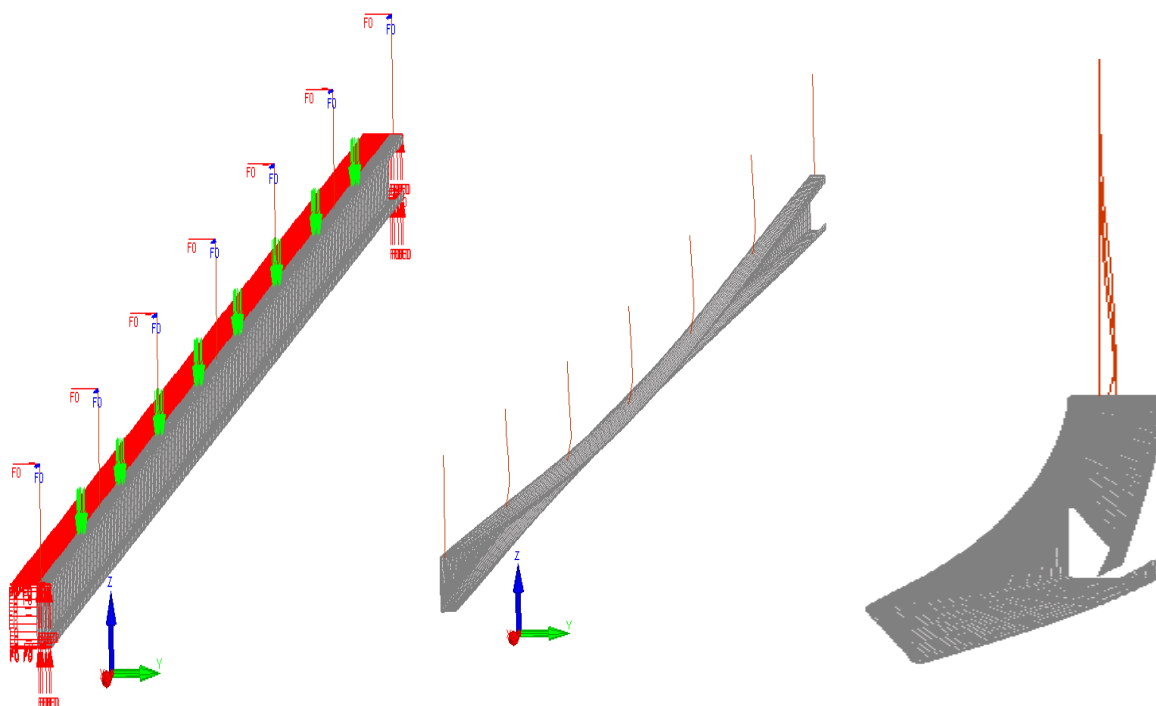


Figura 4.28 - Comportamento de um perfil restringido por uma chapa perfilada em carregamentos descendentes

4.4.2.3.2. Situação de incêndio

Em situação de incêndio para carregamentos descendentes, a metodologia de cálculo utilizada é a mesma que à temperatura ambiente. O valor da carga de colapso é obtido através do programa de elementos finitos SAFIR. O procedimento é semelhante ao apresentado no ponto 4.3.3.1.2.

Na Tabela 4.17 estão sintetizados os valores necessário à determinação da tensão de colapso em situação de incêndio, numa situação de carregamento descendente.

Não são apresentadas ilustrações do comportamento estrutural do conjunto, uma vez que é muito semelhante ao que se passa à temperatura ambiente.

Tabela 4.17 - Tensão de colapso obtida, para carregamentos descendentes, pela modelação numérica para perfis com chapas de revestimento a 500°C

P_{colapso} (N/m)	102.9
M_{colapso} (kN.m)	0.5
σ_{colapso} (Mpa)	45.0

4.4.3. Discussão de resultados

Na Tabela 4.18 estabelece-se uma comparação entre os resultados obtidos, através da formulação preconizada pela parte 1-3 do Eurocódigo 3 e da modelação numérica, para a tensão de colapso e a tensão de colapso de referência em elementos de aço enformados a frio com 320 MPa de tensão de cedência. A temperaturas elevadas o valor da tensão de cedência é afetado de um fator corretivo pelo que toma o valor de 115.2 MPa.

Numa situação de carregamentos ascendentes os valores obtidos para a tensão de colapso traduzem a resistência à encurvadura do banzo livre (comprimido). Pela análise dos valores apresentados é perceptível que à temperatura ambiente a formulação do EC3 subdimensiona a capacidade resistente do conjunto. O facto de o valor obtido para a tensão de colapso ser inferior à tensão de referência, sugere que a metodologia preconizada pela parte 1-3 do Eurocódigo 3 considera que é possível obter uma carga de colapso superior à obtida numericamente. Tomando o modelo numérico como uma aproximação detalhada do real comportamento da estrutura conclui-se que para esta situação em particular o EC3 se revela inseguro.

Pode-se fazer uma análise semelhante para carregamentos descendentes, quer à temperatura ambiente quer em situação de incêndio. Nestes casos o subdimensionamento é

ainda mais acentuado. Tal facto pode ser justificável com a ausência de formulação específica no Eurocódigo 3, para contemplar os casos em que o banzo livre se encontra tracionado e o banzo comprimido restringido, o que levou a obter a tensão de colapso do elemento estrutural com base na resistência da secção transversal.

Em carregamentos ascendentes a temperaturas elevadas, características em situação de incêndio, os valores obtidos para a tensão de colapso são superiores aos valores obtidos para a tensão de referência o que sugere que o dimensionamento proposto pelo EC3 é seguro e conservativo, apesar de não apresentar especificações para enformados a frio com secção transversal em “C” a temperaturas elevadas.

Tabela 4.18 - Comparação entre os resultados obtidos para a tensão de colapso e a tensão de colapso de referência

Temperatura ° C	Carregamento ascendente		Carregamento descendente	
	colapso obtido (Mpa)	colapso referência (Mpa)	colapso obtido (Mpa)	colapso referência (Mpa)
20	243.3	320	79.8	320
500	125.1	115.2	45.0	115.2

No que diz respeito aos ganhos conferidos pelas chapas de revestimento, constata-se que em carregamentos ascendentes –banzo livre comprimido - os valores obtidos para a carga crítica ($P_{crítico}$) através da modelação numérica para o modelo que considera a chapa de revestimento são semelhantes, quer à temperatura ambiente (275.6 N/m e 273 N/m), quer em situação de incêndio (111.8 N/m e 147.9 N/m), aos conseguidos para o modelo numérico que considera apenas o perfil com uma restrição lateral a atuar no banzo superior (modelo 2).

Quer isto dizer que o comportamento de estabilidade um perfil restringido superiormente com uma chapa perfilada é semelhante ao de um perfil com uma restrição axial aplicada, ao longo do desenvolvimento, no banzo superior. Isto é, a rigidez lateral conferida pelas chapas perfiladas ao perfil faz-se prevalecer face à rigidez rotacional. No entanto, no que diz respeito ao cálculo da tensão de colapso, o facto de as chapas perfiladas conferirem quer restrição lateral quer restrição rotacional traduz-se num aumento significativo da resistência à encurvadura lateral do elemento quando comparado com o que se passa no modelo 2.

Em carregamento descendentes, num vão simplesmente apoiado restringindo por chapas de revestimento no banzo superior, o banzo livre encontra-se sujeito a tensões de tração.

Este tipo de situação não está especificada na parte 1-3 Eurocódigo 3. Como tal a avaliação da resistência do conjunto estrutural realizou-se com base na resistência da secção transversal, pelo que não foi possível contabilizar o efeito produzido pelas chapas de revestimento no perfil

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões gerais

5.2. Desenvolvimentos futuros

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões gerais

Na presente dissertação foi elaborado um estudo geral sobre vigas enformadas a frio e o seu comportamento à temperatura ambiente e em situação de incêndio.

Para uma melhor compreensão dos fenómenos que ocorrem devido às diferentes solicitações a que um elemento pode estar sujeito foram introduzidos alguns conceitos teóricos.

Algumas regras sobre o dimensionamento de acordo com o Eurocódigo 3 à temperatura normal e a temperaturas elevadas encontram-se presentes e discriminadas de acordo com o elemento de estudo. Foram adotadas duas abordagens distintas, uma das quais incidiu no dimensionamento do elemento isolado e a outra focou-se no dimensionamento do conjunto madre mais chapa de revestimento.

De modo a perceber a influência das chapas perfiladas no dimensionamento estrutural de madres enformadas a frio encontra-se neste trabalho uma análise dos parâmetros que influenciam as restrições proporcionadas pelas chapas perfiladas aos perfis.

No estudo numérico foi escolhida uma secção transversal específica para a madre e para as chapas perfiladas, foram definidos vários modelos numéricos a usar em dois programas distintos, o SAFIR para determinar as cargas de colapso e o RUBY para obter as cargas críticas e os modos de instabilidade (é uma interface do Cast3m) de modo a se retirar a informação relevante para o estudo pretendido.

Após a recolha e o tratamento dos resultados foi possível chegar algumas conclusões, tais como:

No estudo de madres com diferentes graus de liberdade restringidos:

- Quanto mais restrições possuir o elemento maior é a relação entre os valores obtidos, para a tensão de colapso, através do EC3 e da modelação numérica ;
- Uma restrição à rotação em torno do eixo longitudinal (x-x) aplicada, na coordenada y do C.G da secção transversal, no banzo superior é mais efetiva que

uma restrição ao deslocamento lateral aplicada no banzo superior ao longo da extensão do elemento;

- Os resultados alcançados pelas metodologias preconizadas pelo EC3 revelam-se superiores no modelo 1 e 2 aos conseguidos através da modelação numérica o que nos remete para a ideia de insegurança, sobretudo quando os elementos possuem restrições pouco efetivas.
- A 500 °C nos modelos sem restrições ou com restrições pouco efetivas (modelo 1 e modelo 2) os resultados alcançados para a tensão de colapso pelo EC3 são, aproximadamente, o dobro dos obtidos pela modelação numérica. Se nestes modelos a formulação do Eurocódigo parece ser insegura, nos modelos 3 e 4 (com restrições significativas) a formulação preconizada pelas disposições Europeias aproxima-se dos valores atingidos na modelação numérica. Sendo que no modelo 4 o EC3 apresentar valores algo conservativos.

No estudo das madres restringidas por chapas de revestimento

- Os valores obtidos para a carga crítica através ($P_{crítico}$) da modelação numérica são semelhantes aos conseguidos para o modelo numérico que considera o perfil com uma restrição lateral a atuar no banzo superior (modelo 2);
- O valor obtido para a tensão de colapso para o modelo que considera o efeito da chapa perfilada é superior ao atingido no modelo 2;
- A rigidez rotacional à flexão proporcionada pelas chapas perfiladas à madre é pouco significativa;
- À temperatura ambiente (20°C) parte 1-3 do Eurocódigo subdimensiona a tensão de colapso para o conjunto perfil mais chapa perfilada;
- Em situação de incêndio (500°C) a parte 1-3 do EC3 apresenta um valor conservativo quando comparado com o exibido pelo modelo numérico;
- Em carregamentos descendentes o Eurocódigo 3 não contém especificações para os casos em que o banzo comprido é o que e está restringido pelas chapas perfiladas (caso de carregamentos descendentes em vigas simplesmente apoiadas);

É também de realçar que o EC3 é por vezes pouco claro nas considerações a ter em conta para os perfis enformados a frio e que para secções mais específicas torna-se muito complicado perceber quais as condições a adotar. Em alguns casos foi necessário ter uma leitura mais específica e ter especial atenção a alguns pontos muito genéricos e alternativos propostos pelo EC3 que não eram aplicáveis ao caso de estudo em questão.

5.2.Desenvolvimentos futuros

Depois de uma análise ao trabalho desenvolvido nesta dissertação alguns pontos revelaram ser importantes no comportamento de elementos de aço enformados a frio, como elementos estruturais.

O estudo realizado nesta dissertação foi vocacionado para uma secção transversal em “C” específica de um elemento simplesmente apoiado. Torna-se necessário realizar o estudo para outras secções transversais - em “C” com outras dimensões, ou com outra geometria “Z” e “Σ” por exemplo - e com outras condições de apoio (vãos de extremidade com continuidade, vãos intermédios de vigas contínuas...).

No que diz respeito às chapas perfiladas é necessário analisar chapas com configurações distintas da adotada neste trabalho (“P1-272-30”) de modo a compreender melhor a influência que estas têm no dimensionamento dos perfis.

Seria interessante aprofundar o conceito de “Stressed skin design”, presente na parte 1-3 do EC3, e perceber de que modo a resistência ao corte da ligação das chapas de revestimento ao perfil contribui para um dimensionamento mais eficiente dos perfis.

Uma vez que o Eurocódigo 3, quando se refere aos enformados a frio, se encontra muito direcionado para secções específicas como as abordadas neste trabalho, torna-se necessário proceder ao estudo de secções distintas. No caso de secções menos comuns ou mais complexas o EC3 revela ser pouco claro nas regras que apresenta.

No que toca à parte 1-2 do EC3, relativamente ao fogo, a presente norma encontra-se direcionada para secções muito comuns como perfis em I e H. Não existem pontos específicos para os enformados a frio de secções do tipo C, por exemplo, pelo que se considera um “perfil genérico”, levando a que os limites de resistência impostos sejam demasiado conservativos. Aconselha-se o estudo de eventuais considerações como fatores

de redução aplicáveis apenas para os enformados a frio tornando desta forma a norma mais clara para este tipo de perfis e para outros tipos de seções que são cada vez mais correntes na construção.

CAPÍTULO 6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APEX. (2014), disponível em <http://www.apexsteel.com.au/purlins-girts/c-z-purlins.htm>, [Consult. 18/04/2014, 2014]
- Arrais, F. (2012). *"Comportamento de elementos enformados a frio em situação de incêndio"*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.
- Arrais, F.;Lopes, N.&Vila Real, P. (2014). *"Behaviour and resistance of cold-formed steel beams with lipped channel sections under fire conditions"* Vol. 8th International Conference on Structures in Fire Shanghai, China, June 11-13, 2014.
- Basaglia, Cilmar;Camotim, Dinar;Gonçalves, Rodrigo, *et al.* (2013). *"GBT-based assessment of the buckling behaviour of cold-formed steel purlins restrained by sheeting"*. *Thin-Walled Structures* 72 (2013) 217–229.
- Beg, Darko;Kuhlmann, Ulrike;Davaine, Laurence, *et al.* (2010). *"Design of Plated Structures"* E. D. M. ECCS (Ed.)
- Camotim, Dinar&Borges, P. Dinis. (2010). *"Local/distortional mode interaction in cold-formed steel lipped channel beams"*. *Thin-Walled Structures* 48(2010) 771–785.
- Cast3m. disponível em <http://www-cast3m.cea.fr/index.php?xml=presentation>, [Consult. 28/05/2014]
- CEN, Comité Europeu de Normalização. (2005a). *"EN 1993-1-1 Eurocode3: Design of Steel Structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings"*. Bruxelas, Bélgica.
- CEN, Comité Europeu de Normalização. (2005b). *"EN 1993-1-2 Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-2: General rules Structural fire design"*. Bruxelas, Bélgica.
- CEN, Comité Europeu de Normalização. (2006a). *"EN1993-1-3 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-3 : General rules - Supplementary rules for colf-formed members and sheeting"*. Bruxelas, Bélgica.

- CEN, Comité Europeu de Normalização. (2006b). *"EN 1993-1-5 Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-5: Plated structural elements"*. Bruxelas, Bélgica.
- Chung, K.F.&Ho, H.C. (2005). *"Analysis and design of lapped connections between cold-formed steel Z sections"*. *Thin-Walled Structures* 43 (2005) 1071–1090.
- Constalica. (2014), disponível em http://www.constalica.pt/wp-content/themes/constalica/pdf/catalogo_madremax_pt_en.pdf, [Consult. 18/03/2014, 2014]
- Davies, J. Michael. (2006). *"Developments in stressed skin design"*. *Thin-Walled Structures* 44 (2006) 1250–1260.
- Dubina, Dan;Ungureanu, Viorel&Landolfo, Raffaele. (2012). *"Design of Cold-formed Steel Structures: Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-3 - Design of Cold-formed Steel Structures "* (ECCS First Edition ed.).
- Fena, Rui Pedro Trindade. (2011). *"Interacção entre instabilidade local e distorcional em colunas de aço enformadas a frio de seção em "hat""*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico
- Franssen, J. M. (2011). *"User's manual for SAFIR 2011 a computer program for analysis os structures subjected to fire"*. University of Liège, Department ArGenCO Service Structural Engineering.
- Franssen, J.M&Vila Real, P. M.M. (2010). *"Fire Design of Steel Structures"*.
- Kankanamge, Nirosha Dolamune. (2010). *"Structural Behaviour and Design of Cold-formed Steel Beams at Elevated Temperatures"*. PhD, School of Urban Developments Queensland University of Technology.
- Laím, Luís;Rodrigues, João Paulo C.&Silva, Luis Simões da. (2013). *"Experimental and numerical analysis on the structural behaviour of cold-formed steel beams"*. *Thin-Walled Structures* 72 (2013)1–13.
- Li, Long-yuan. (2009). *"Analyses of distortional buckling of cold-formed sigma purlins using EN1993-1-3"*. *Journal of Constructional Steel Research* 65 (2009) 2099–2102.

- Li, Long-yuan;Ren, Chong&Yang, Jian. (2012). *"Theoretical analysis of partially restrained zed-purlin beams subjected to up-lift loads"*. *Journal of Constructional Steel Research* 70 (2012) 273–279.
- Lim, James B.P.&Young, Ben. (2007). *"Effects of elevated temperatures on bolted moment-connections between cold-formed steel members"*. *Engineering Structures* 29 (2007) 2419–2427.
- Lucas, R. M.;Al-Bermani, F. G. A&Kitipornchai, S. (1997). *"Modelling of Cold-Formed Purlin-Sheeting Systems. Part 1: Full Model"*. *Thin-Walled Structures* Vol. 27, No. 3, pp. 223-243, 1997.
- Martins, Ana A.;Valente, Isabel B.;Feliz, Alexandra, *et al.* (2013). *"Análise experimental e analítica de chapas metálicas enformadas a frio para coberturas e fachadas"*. IX Congresso de Construção Metálica e Mista e I Congresso Luso-Brasileiro de Construção Metálica Sustentável.
- OFELIZ. (2014). *"Chapa Perfilada - Enformados a frio"*.
P22-312-2, NF. (2004). *"Norme française NF P22-312-2, CNCMET Commission de normalisation de la construction métallique"*.
- PERFISA, S.A. (2014). Perfis Metálicos. In PERFISA (Ed.).
- Pilot, Paulo. (2011). *"Resistência ao Fogo de Estruturas Metálicas"*. Disponível em *"Resistência ao Fogo de Estruturas Metálicas"* website: <http://www.engenhariacivil.com/resistencia-fogo-estruturas-metalicas>
- Ranawaka, Thanuja&Mahendran, Mahen. (2009). *"Experimental study of the mechanical properties of light gauge cold-formed steels at elevated temperatures"*. *Fire Safety Journal*, 44(2). pp. 219-229.
- Ranawaka, Thanuja&Mahendran, Mahen. (2010). *"Numerical modelling of light gauge cold-formed steel compression members subjected to distortional buckling at elevated temperatures"*. *Thin-Walled Structures* Volume 48, Issues 4–5, April–May 2010, Pages 334–344.
- Silva, Valdir Pignatta&Azevedo, Macksuel Soares de. (2009). *"Análise térmica de estruturas de aço externas a edificações, sem revestimento contra fogo"*. VII Congresso de Construção Metálica e Mista.

- Silvestre, Nuno&Camotim, Dinar. (2010). *"On the mechanics of distortion in thin-walled open sections"*. *Thin-Walled Structures* 48 (2010) 469–481.
- Vatsala, Metal Sections. (2014). *"Cold Rolled Technology"*, disponível em <http://www.vatsalametsec.com/technology.htm>, [Consult. 14/05/2014]
- Veríssimo, Hugo. (2008). *"Dimensionamento de elementos estruturais de aço enformados a frio de acordo com o Eurocódigo 3"*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico - Lisboa.
- Vila Real, P. M.M. (2003). *"Incêndio em Estruturas Metálicas - Cálculo Estrutural"*.
- Vila Real, P. M.M;Lopes, N.;Silva, L. Simoes da, et al. (2004). *"Lateral-torsional buckling of unrestrained steel beams under fire conditions: improvement of EC3 proposal"*. *Computers & Structures, Volume 82, Issues 20–21, August 2004, Pages 1737–1744*.
- Wei-Wen, Yu. (1999). *"Cold-Formed Steel Structures"*. *Structural Engineering Handbook*, Ed. Chen Wai-Fah, Boca Raton: CRC Press LLC, 60.
- Wei-Wen, Yu. (2000). *"Cold-Formed Steel Design"*. In I. John Wiley & Sons (Series Ed.) Vol. 3rd Edition. I. John Wiley & Sons (Ed.)
- Ye, Zhi-ming;Kettle, Roger J.;Li, Long-yuan, et al. (2002). *"Buckling behavior of cold-formed zed-purlins partially restrained by steel sheeting"*. *Thin-Walled Structures* 40 (2002) 853–864.
- Ye, Zhi-ming;Li, Long-yuan&Kettle, Roger. (2004). *"Analysis of cold-formed zed-purlins partially restrained by steel sheeting"*. *Computers and Structures* 82 (2004) 731–739.
- Young, Ben&Ellobody, Ehab. (2007). *"Design of cold-formed steel unequal angle compression members"*. *Thin-Walled Structures* 45 (2007) 330–338.

ANEXOS

A.1 PROGRAMA SAFIR

Serve o presente anexo para fornecer uma breve explicação à cerca do modo de utilização do programa SAFIR, usado no presente trabalho.

As informações que se apresentam de seguida são apenas linhas orientadoras não sendo a informação totalmente específica.

Na realização do presente trabalho foi necessário criar uma pasta com os seguintes 4 itens:

- Ficheiro “teste” *input* que contém todos os dados relativamente à geometria e as propriedades do material;
- Ficheiro “fload” que contém os dados quanto à aplicação de carga ao longo do tempo;
- Ficheiro “t.” que contém a informação da temperatura ao longo do tempo e ao longo da espessura do material;
- Ficheiro “SAFIR2011” executável para fazer a análise de todos os ficheiros input.

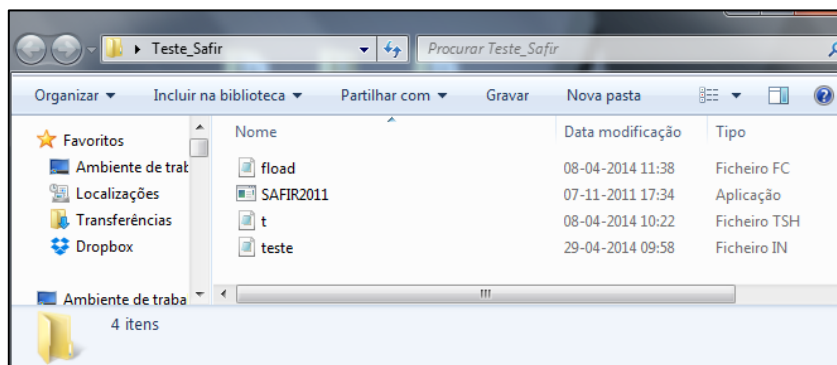


Figura A.1 - Pasta com os ficheiros necessários à utilização do SAFIR

O ficheiro “teste”, apresentado na Figura A.1, contém inúmeras informações como:

- N.º de nós;
- Dimensão;
- N.º de materiais;
- N.º de elementos de casca;

- N.º de camadas;
- Nó e respetivas coordenadas em x, y e z.
- As restrições $\delta_x, \delta_y, \delta_z, \phi_x, \phi_y, \phi_z$
- A precisão;
- As cargas aplicadas $P_x, P_y, P_z, M_x, M_y, M_z$
- Designação do material;
- Características físicas e mecânicas do material;
- Intervalos de tempo do ensaio e tempo limite;
- Impressão de dados pretendidos.

```

teste - Bloco de notas
Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda
InputFile created with GiD-SAFIR_2007 Interface
Safir_Static_3D_Analysis
Mesh_from_GiD-Mesher

NNODE 14079
NDIM 3
NDDLMAX 6
EVERY_NODE 6
END_NDDL
SOLVER PARDISO
DYNAMIC APPR_NR
NLOAD 1
OBLIQUE 0
COMEBACK 0.0001
RENUMGE0 1
NMAT 1
ELEMENTS
SHELL 13680 1
NGTHICK 3
NGAREA 2
NREBARS 0
END_ELEM
NODES
NODE 1 0.00000 0.04150 -0.04000
NODE 2 0.00000 0.04150 -0.04713
NODE 3 0.00000 0.04150 -0.05105
NODE 4 0.00000 0.04126 -0.05227
NODE 5 0.00000 0.04056 -0.05331
NODE 6 0.00000 0.03952 -0.05401
NODE 7 0.00000 0.03830 -0.05425
NODE 8 0.00000 0.03320 -0.05425
NODE 9 0.00000 0.02490 -0.05425
NODE 10 0.00000 0.01322 -0.05425
NODE 11 0.00000 0.00830 -0.05425
    
```

Figura A.2 - Conteúdo do ficheiro “teste” parte 1 de 3

```

teste - Bloco de notas
Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda
NODELOAD 10910 0.000E+00 0.00E+00 4.688E-02 0.00E+00
NODELOAD 10949 0.000E+00 0.00E+00 9.38E-02 0.00E+00
NODELOAD 10988 0.000E+00 0.00E+00 4.688E-02 0.00E+00
NODELOAD 10911 0.000E+00 0.00E+00 9.375E-02 0.00E+00
NODELOAD 10950 0.000E+00 0.00E+00 1.875E-01 0.00E+00
NODELOAD 10989 0.000E+00 0.00E+00 9.38E-02 0.00E+00
NODELOAD 10912 0.000E+00 0.00E+00 4.688E-02 0.00E+00
NODELOAD 10951 0.000E+00 0.00E+00 9.375E-02 0.00E+00
NODELOAD 10990 0.000E+00 0.00E+00 4.688E-02 0.00E+00
NODELOAD 12470 0.000E+00 0.00E+00 4.688E-02 0.00E+00
NODELOAD 12509 0.000E+00 0.00E+00 9.38E-02 0.00E+00
NODELOAD 12548 0.000E+00 0.00E+00 4.688E-02 0.00E+00
NODELOAD 12471 0.000E+00 0.00E+00 9.375E-02 0.00E+00
NODELOAD 12510 0.000E+00 0.00E+00 1.875E-01 0.00E+00
NODELOAD 12549 0.000E+00 0.00E+00 9.38E-02 0.00E+00
NODELOAD 12472 0.000E+00 0.00E+00 4.688E-02 0.00E+00
NODELOAD 12511 0.000E+00 0.00E+00 9.375E-02 0.00E+00
NODELOAD 12550 0.000E+00 0.00E+00 4.688E-02 0.00E+00
END_LOAD
MASS
M_SHELL 1 780.000000
GM_SHELL 13680 780.000000 1
END_MASS
MATERIALS
STEELEC32D
2.10e+11 3.00e-01 3.20e+08 1200. 0.
TIME
0.017 40000.0 400.0
ENDTIME
NOEPSTH
IMPRESSION
TIMEPRINT
0.001 15000.0
END_TIMEPR
    
```

Figura A.3 - Conteúdo do ficheiro “teste” parte 2 de 3

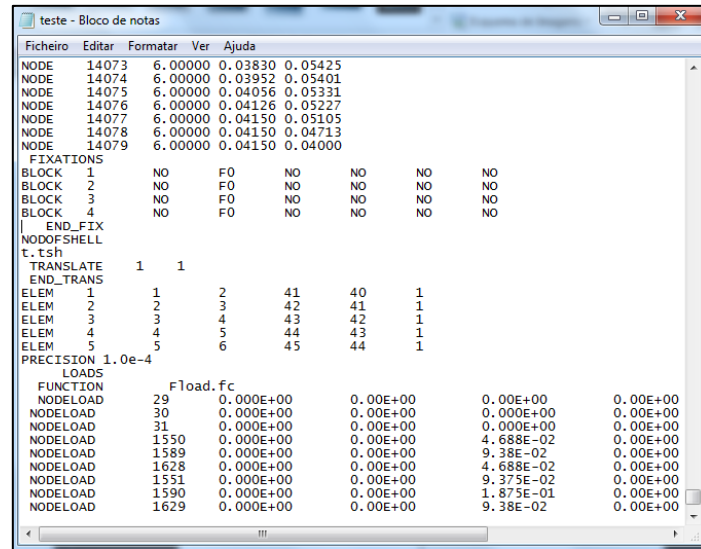


Figura A.4 - Conteúdo do ficheiro “teste” parte 3 de 3

Neste trabalho para a elaboração dos ficheiros *input*, devido à quantidade de dados a tratar na definição do modelo, criou-se uma folha de cálculo no Microsoft Office Excel. Posteriormente copiaram-se os dados da folha de cálculo para o bloco de notas de modo a criar os ficheiros *input*.

No ficheiro “fload” encontra-se definida a evolução da carga a aplicar em função do tempo.

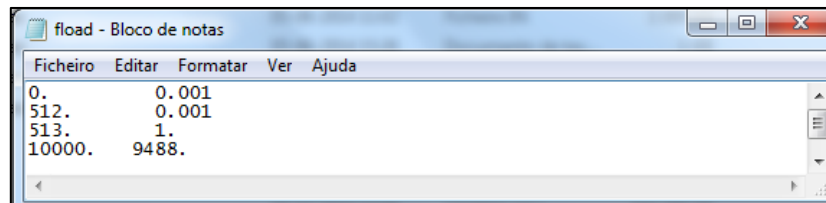


Figura A.5 - Conteúdo do ficheiro “fload”

O documento “t” tem como função definir a temperatura a que está sujeito o perfil por camadas da espessura do material. Esta especificação ocorre para várias temperaturas intermédias caso o utilizador assim o pretenda, desde a temperatura normal até à temperatura máxima requerida pelo utilizador.

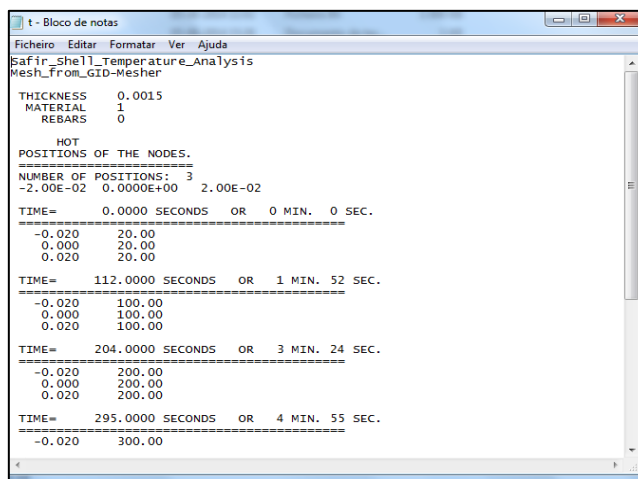


Figura A.6 - Conteúdo do ficheiro “t” para temperaturas elevadas

Caso o ensaio ocorra à temperatura normal apenas será necessário substituir no documento o termo “HOT” por “COLD” e não inserir mais nenhuma informação de seguida.

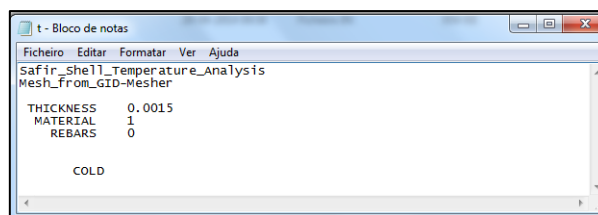


Figura A.7 - Conteúdo do ficheiro “t”

Concluído o tratamento de dados a inserir para o programa efetuar a sua análise, o ficheiro SAFIR2011 deve ser executado iniciando o processo com a digitação do termo “teste”.

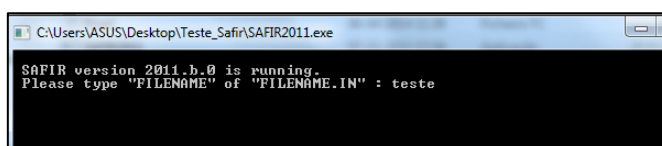


Figura A.8 - Ficheiro Executável “SAFIR2011”

Após inserido o comando “teste”, o programa SAFIR reconhece o ficheiro na pasta inicial dando início ao processo de análise, encerrando automaticamente quando esta estiver concluída.

Concluída a análise, o programa cria, na pasta inicial, uns ficheiros “output” com a informação final obtida.

Para a leitura dos ficheiros de saída do programa, recorreu-se ao software “Diamond2011.a.2”.

A.2 PROGRAMA RUBY

Este anexo fornece uma breve explicação do modo de utilização do programa Ruby, usado no presente trabalho.

A utilização do programa RUBY, requer o ficheiro input (“teste”) usado no SAFIR, de modo a que o programa possa, para as mesmas condições iniciais, determinar a carga crítica e os modos de instabilidade do elemento.

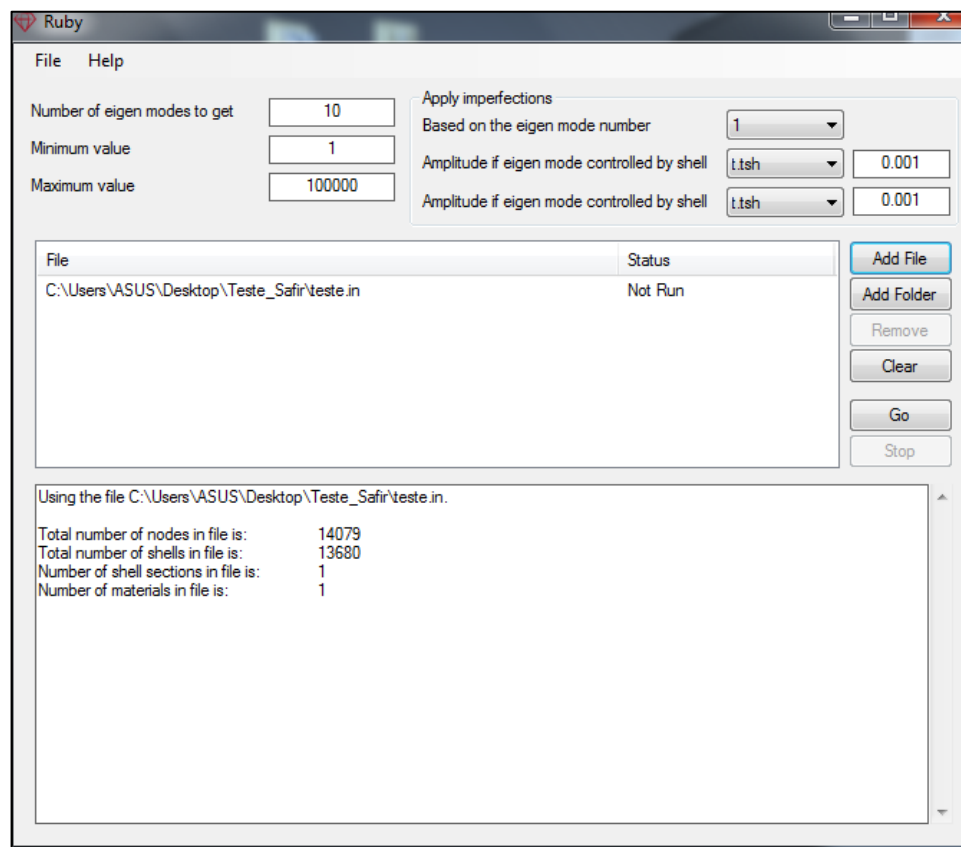


Figura A.9 - Layout do programa RUBY

Antes de se efetuar a análise no RUBY (“Go”), deve-se definir o número de modos de instabilidade que se pretende (“Number of eigen to get”) e o intervalo de valores pretendidos.

No separador “File” deve-se ir às opções gerais definir que se pretende que o RUBY crie um ficheiro “output” para posterior visualização (“Diamond2011.a.2”) dos modos de instabilidade obtidos.

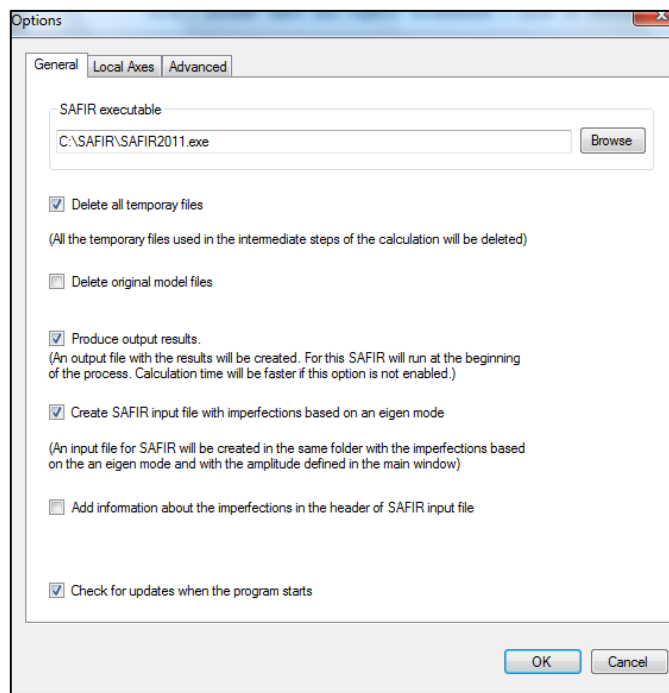


Figura A.10 - Opções gerais RUBY

É ainda possível definir a correspondência entre eixos pretendida entre as interfaces RUBY e SAFIR. Da mesma maneira pode ser definida, nas opções avançadas, uma série de configurações para os modos de instabilidade.

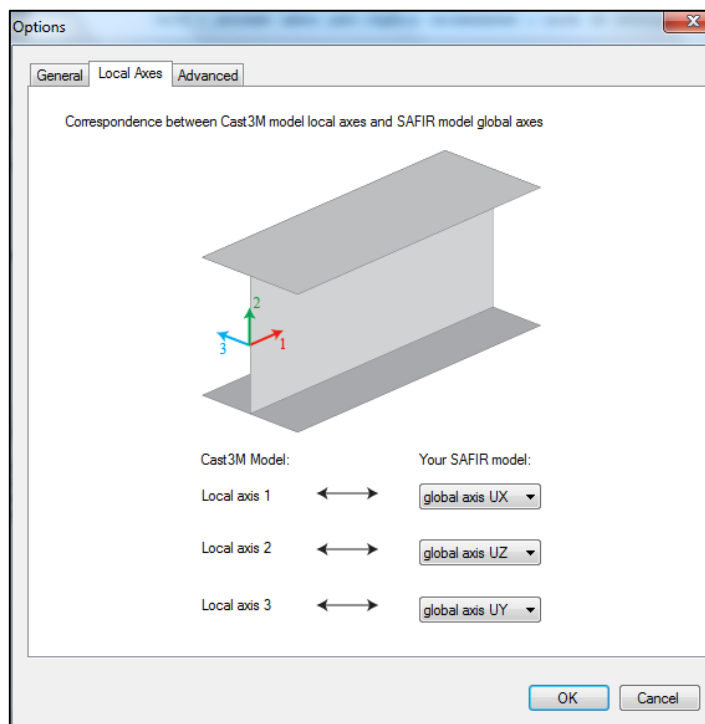


Figura A.11 - Correspondência entre eixos referenciais RUBY

